

# **ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DE PROGRAMAS COMERCIAIS NA MODELAÇÃO DE BARRAGENS DE ATERRO**

**JOÃO CRISTOVÃO CUNHA LIMA DO CARMO REIS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor José Manuel Mota Couto Marques

JANEIRO DE 2017

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Mãe

*Our greatest weakness lies in giving up. The most certain way to succeed is always to  
try just one more time.  
Thomas A. Edison.*



## **AGRADECIMENTOS**

Concluída esta etapa tão importante do meu percurso académico, não posso deixar de agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente me impulsionaram e contribuíram para o alcance de todos os meus objetivos e, de um modo muito especial, ao Professor José Couto Marques, pela sua paciência, pelas suas valiosas sugestões e análises críticas.

Aos meus colegas de Curso, o Cristiano, o Fábio, o Cascarejo, o Tiago e o Pedro, pela amizade e companheirismo que tiveram para comigo ao longo de tantas e tantas noites de trabalho na Faculdade nesta última fase.

Ao meu grande amigo Eduardo Rodrigues, que ao longos de todos estes anos de curso me apoiou e me incentivou, cultivando e mantendo viva esta grande amizade que ficará para sempre.

Ao Paradinha, companheiro de eleição, com quem pude contar nos bons e maus momentos. Ao Filipe, ao Samuel, ao Chico, ao Tomé, ao Fred, amizades desde o tempo do Liceu, partilhadas com o lado mais positivo e construtivo, quer pelos conselhos, quer pela força das palavras no sentido do alcance de todos os meus objetivos.

À Raissa quero agradecer todos os momentos que partilhamos, que me proporcionaram uma sincera felicidade. A sua influência fez de mim uma pessoa melhor e faz-me querer melhorar ainda mais.

Devo um agradecimento sincero a toda a minha família que sempre me apoiou, não podendo deixar de salientar duas pessoas muito especiais: a minha Tia Arminda e a minha Tia João, pois não seria a pessoa que sou hoje sem o apoio e contributo da minha "mãe outra" e da minha madrinha.

Infelizmente são poucas a vezes que tenho a coragem necessária para manifestar e exprimir o meu agradecimento aos que me são mais que tudo. Por isso, quero aproveitar este momento para expressar ao meu irmão Gonçalo, que apesar das nossas pequenas lutas, não existe no mundo ninguém que eu quisesse mais para meu irmão.

Ao meu Pai, que sempre me amou e apoiou, dizer-lhe apenas que Pai há só um, tu; ontem, hoje e sempre!

À minha Mãe, que nem sempre me deu tudo o que eu quis ou pedi, mas que sempre fez todos os sacrifícios para me dar tudo aquilo que precisei. Nunca te poderei recompensar por tudo aquilo que fizeste por mim, tenho consciência disso, mas mesmo assim, pretendo tentar.

A todos vós, companheiros, amigos, familiares, no final deste ciclo, repleto de momentos tão difíceis e momentos tão bons que todos vocês de uma ou de outra forma testemunharam, o meu mais sincero Obrigado!



## **RESUMO**

As forças de percolação em solos impõem ações nos mesmos, resultantes do movimento de águas que os atravessam, que alteram a distribuição de forças de massa e, como consequência, as tensões efetivas nos maciços.

O presente trabalho tem como principal objetivo a comparação do funcionamento e dos resultados de programas comerciais de modelação numérica que possibilitam quer a análise do comportamento hidráulico, quer a verificação da estabilidade de barragens de aterro.

Atualmente existem diversos programas que analisam as pressões de água, cargas hidráulicas, velocidades e forças de percolação, assim como a estabilidade de maciços ou a probabilidade de rotura.

A realização deste trabalho vem comprovar que, quando utilizados corretamente, programas comerciais diferentes chegarão a resultados semelhantes na modelação do comportamento hidráulico e na verificação da estabilidade de barragens de aterro.

Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação, mais do que a obtenção de resultados, aponta para a utilização criticamente comparada de diferentes ferramentas numéricas na solução de problemas deste âmbito.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de percolação, análise de estabilidade, barragens de aterro, programas comerciais, métodos numéricos.





## **ABSTRACT**

Seepage forces impose actions on the soil resulting from the movement of water flowing through them, which modify the spatial distribution of volume forces and, as a consequence, the effective stresses in the soil masses.

The main objective of this work is to compare the operation and the results of commercial software tools for numerical modelling of the hydraulic behaviour, as well as the stability analysis of earth dams.

Currently there are several programs that analyse water pressures, hydraulic loads, velocities and seepage forces, as well as the global stability or the probability of failure for this type of works.

The results obtained confirm that, when correctly employed, different software tools will achieve similar results in the hydraulic and stability modelling of earth dams.

Therefore, the main objective of this dissertation, beyond the achievement of results, points to the critically compared application of commercial software tools in the solution of problems of this kind.

**KEY WORDS:** Seepage analysis, stability analysis, earth dams, commercial programs, numerical methods.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS .....	1
1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	1
<b>2. BARRAGENS.....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. TIPOS DE BARRAGENS.....	3
2.3. BARRAGENS DE ENROCAMENTO .....	8
2.3.1. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	9
2.4. MODELO DE BARRAGEM UTILIZADO .....	10
2.4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM.....	10
2.4.2. PERFIL TIPO.....	12
2.4.3. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS .....	14
<b>3. PERCOLAÇÃO EM SOLOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	17
3.2. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA .....	17
3.3. LEI DE DARCY .....	19
3.4. PERMEABILIDADE DE UM SOLO .....	20
3.4.1. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE .....	20
3.4.1.1. Ensaio com permeâmetro de carga constante .....	20
3.4.1.2. Ensaio com permeâmetro de carga variável.....	21
3.4.1.3. Ensaio de bombagem permanente .....	23
3.4.2. FATORES QUE AFETAM A PERMEABILIDADE .....	25
3.4.2.1. Granulometria.....	25
3.4.2.2. Índice de vazios.....	25
3.4.2.3. Viscosidade do Fluido e Temperatura .....	26

3.4.2.4. Grau de Saturação .....	27
3.4.2.5. Estrutura do Solo.....	28
3.4.2.6. Composição Mineralógica .....	28
3.4.2.7. Permeabilidade em Maciços Estratificados .....	28

## **4. MODELAÇÃO BIDIMENSIONAL.....31**

4.1. INTRODUÇÃO .....	31
4.2. GEOMETRIA DO MODELO .....	32
4.3. DEFINIÇÃO DE MATERIAIS .....	33
4.3.1. SEEP/W .....	33
4.3.2. RS2.....	37
4.4. DEFINIÇÃO DA MALHA .....	42
4.4.1. SEEP/W .....	42
4.4.2. RS2.....	43

## **5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO .....47**

5.1. INTRODUÇÃO .....	47
5.2. PLENO ARMAZENAMENTO.....	47
5.2.1. SEEP/W .....	47
5.2.2. RS2.....	52
5.2.3. RESULTADOS.....	54
5.3. Esvaziamento Rápido .....	58
5.3.1. SEEP/W .....	58
5.3.2. RS2.....	61
5.3.3. RESULTADOS.....	63

## **6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....73**

6.1. INTRODUÇÃO .....	73
6.2. ESTABILIDADE DE MONTANTE - SLOPE/W .....	74
6.3. ESTABILIDADE DE JUSANTE-SLOPE/W .....	82
6.4. ESTABILIDADE DE MONTANTE-SLIDE .....	85
6.5. ESTABILIDADE DE JUSANTE-SLIDE .....	95
6.6. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MONTANTE .....	98

<b>6.7. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE JUSANTE .....</b>	<b>101</b>
--	------------

## **7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS ....105**

<b>7.1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
------------------------------	------------

<b>7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>106</b>
--	------------

<b>ANEXO I.....</b>	<b>109</b>
---------------------	------------

<b>ANEXO II.....</b>	<b>117</b>
----------------------	------------

<b>ANEXO III.....</b>	<b>155</b>
-----------------------	------------



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Barragens em arco de raio variável (esq.) e de raio constante [3].	4
Fig. 2.2 – Barragem em arco [3].	4
Fig. 2.3 – Seção transversal de uma barragem de gravidade [3].	5
Fig. 2.4 – Representação das forças atuantes numa barragem de contrafortes [4].	5
Fig. 2.5 – Exemplos de barragens de contrafortes [3].	6
Fig. 2.6 – Exemplos de barragem homogénea (esq.) e zonada [3].	6
Fig. 2.7 – Seção homogénea [3].	7
Fig. 2.8 – Seção homogénea com filtro e material rochoso [3].	7
Fig. 2.9 – Seção homogénea com tapete drenante [3].	7
Fig. 2.10 – Seção homogénea com dreno em chaminé [3].	7
Fig. 2.11 – Barragem de terra zonada [5].	8
Fig. 2.12 – Barragem de enrocamento [6].	8
Fig. 2.13 – Elementos que constituem uma barragem de enrocamento.	9
Fig. 2.14 – Localização da barragem de São Domingos.	10
Fig. 2.15 – Imagens aéreas da barragem de São Domingos [7].	11
Fig. 2.16 – Planta da barragem de São Domingos [8].	13
Fig. 2.17 – Perfil usado da barragem de São Domingos [8].	13
Fig. 2.18 – Perfil exportado do Autocad 2016.	14
Fig. 2.19 – Materiais que constituem os elementos da barragem.	14
Fig. 2.20 – Fuso granulométrico dos elementos da barragem [8].	15
Fig. 3.1 – Perda de carga de uma partícula [16].	19
Fig. 3.2 – Intervalo de variação de $k$ para diferentes solos [14].	20
Fig. 3.3 – Ensaio com permeâmetro de carga constante [13].	21
Fig. 3.4 – Ensaio com permeâmetro de carga variável [13].	22
Fig. 3.5 – Escoamento não confinado numa camada homogénea [17].	23
Fig. 3.6 – Escoamento confinado [17].	24
Fig. 3.7 – Granulometria de uma amostra com e sem partículas finas [9].	25
Fig. 3.8 – Alteração da permeabilidade com o grau de saturação [9].	28
Fig. 3.9 – Percolação vertical.	29
Fig. 3.10 – Percolação horizontal.	30
Fig. 4.1 – Perfil 7 da barragem de São Domingos.	32

Fig. 4.2 – Dimensões do perfil modelo.....	33
Fig. 4.3 – SEEP/W - Introduzir materiais. ....	34
Fig. 4.4 – SEEP/W - Criação de materiais. ....	34
Fig. 4.5 – SEEP/W - Definição do enrocamento de montante.....	35
Fig. 4.6 – SEEP/W - Função de condutividade hidráulica do enrocamento de montante.....	36
Fig. 4.7 – SEEP/W - Teor em água volumétrico do enrocamento de montante.....	36
Fig. 4.8 – SEEP/W - Atribuição de materiais. ....	37
Fig. 4.9 – RS2 - Adicionar materiais.....	38
Fig. 4.10 – RS2 - Propriedades, interação sólido-fluido desacoplada. ....	39
Fig. 4.11 – RS2 - Propriedades hidráulicas. ....	39
Fig. 4.12 – RS2 - Definição do enrocamento de montante.....	40
Fig. 4.13 – RS2 - Função de condutividade hidráulica do enrocamento de montante.....	40
Fig. 4.14 – RS2 - Teor em água volumétrico do enrocamento de montante.....	41
Fig. 4.15 – RS2 - Atribuição de materiais. ....	41
Fig. 4.16 – SEEP/W - Propriedades da malha.....	42
Fig. 4.17 – SEEP/W - Definição da malha. ....	43
Fig. 4.18 – SEEP/W - Malha. ....	43
Fig. 4.19 – RS2 - Propriedades da malha.....	44
Fig. 4.20 – RS2 - Definição da malha. ....	44
Fig. 4.21 – RS2 - Definir deslocamentos. ....	45
Fig. 4.22 – RS2 - Malha e deslocamentos definidos.....	45
Fig. 5.1 – SEEP/W - Menu Análises.....	48
Fig. 5.2 – SEEP/W - Definição de convergência.....	48
Fig. 5.3 – SEEP/W - Definição do tempo de análise.....	49
Fig. 5.4 – SEEP/W - Geometria, materiais e malha definidos. ....	49
Fig. 5.5 – SEEP/W - Condições de fronteira.....	50
Fig. 5.6 – SEEP/W - Definição das condições de fronteira para montante e jusante.....	50
Fig. 5.7 – SEEP/W - Regime permanente a montante e condição de fronteira a jusante.....	51
Fig. 5.8 – SEEP/W - Atribuição das condições de fronteira.....	51
Fig. 5.9 – SEEP/W - Iniciar análise. ....	51
Fig. 5.10 – RS2 - Geometria, materiais e malha definidos. ....	52
Fig. 5.11 – RS2 - Definições de Projeto, nível freático. ....	52
Fig. 5.12 – RS2 - Convergência. ....	53



Fig. 5.13 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira.....	53
Fig. 5.14 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira, carga hidráulica. ....	53
Fig. 5.15 – RS2 – Condições fronteira de montante e jusante. ....	54
Fig. 5.16 – RS2 - Computação.....	54
Fig. 5.17 – SEEP/W e RS2 - Definir isocurvas. ....	55
Fig. 5.18 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica.....	55
Fig. 5.19 – SEEP/W e RS2 - Pressão neutra.....	56
Fig. 5.20 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica. ....	57
Fig. 5.21 – SEEP/W e RS2 - Vetores de fluxo.....	57
Fig. 5.22 – SEEP/W - Definições de análise transitória.....	58
Fig. 5.23 – SEEP/W - Definição do tempo de análise. ....	59
Fig. 5.24 – SEEP/W.- Criação de condições de fronteira. ....	60
Fig. 5.25 – SEEP/W - Função de esvaziamento de montante.....	60
Fig. 5.26 – SEEP/W - Condições fronteira de montante e jusante. ....	61
Fig. 5.27 – RS2 - Definição do tempo de análise.....	61
Fig. 5.28 – RS2 - Definições de análise transitória. ....	62
Fig. 5.29 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira, exemplo para 0 e 24 horas.....	62
Fig. 5.30 – RS2 - Computação.....	63
Fig. 5.31 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para instante inicial.....	64
Fig. 5.32 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 1 dia.....	64
Fig. 5.33 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 3 dias.....	65
Fig. 5.34 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 30 dias.....	65
Fig. 5.35 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 120 dias.....	66
Fig. 5.36 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para o instante inicial. ....	66
Fig. 5.37 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 1 dia. ....	67
Fig. 5.38 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 3 dias. ....	67
Fig. 5.39 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 30 dias. ....	68
Fig. 5.40 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 120 dias. ....	68
Fig. 5.41 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para o instante inicial. ....	69
Fig. 5.42 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 1 dia. ....	69
Fig. 5.43 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 3 dias. ....	70
Fig. 5.44 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 30 dias. ....	70
Fig. 5.45 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 120 dias. ....	71

Fig. 6.1 – SLOPE/W - Menu Análises. ....	75
Fig. 6.2 – SLOPE/W - Superfícies de escorregamento. ....	76
Fig. 6.3 – SLOPE/W - Distribuição do fator de segurança. ....	76
Fig. 6.4 – SLOPE/W - Definições avançadas. ....	77
Fig. 6.5 – SLOPE/W - Parâmetros de convergência. ....	78
Fig. 6.6 – SLOPE/W - Parâmetros de convergência do regime transitório. ....	78
Fig. 6.7 – SLOPE/W - Adicionar materiais. ....	79
Fig. 6.8 – SLOPE/W - Definição da Fundação 3. ....	79
Fig. 6.9 – SLOPE/W - Definição de materiais. ....	80
Fig. 6.10 – SLOPE/W - Superfícies de escorregamento. ....	81
Fig. 6.11 – SLOPE/W - Definição da grelha e raios de montante. ....	81
Fig. 6.12 – SLOPE/W - Definição dos limites de montante. ....	82
Fig. 6.13 – SLOPE/W - Caracterização completa de montante. ....	82
Fig. 6.14 – SLOPE/W - Menu Análises. ....	83
Fig. 6.15 – SLOPE/W - Superfície de escorregamento de jusante. ....	83
Fig. 6.16 – SLOPE/W - Definição da grelha e raios de jusante. ....	84
Fig. 6.17 – SLOPE/W - Definição dos limites de jusante. ....	84
Fig. 6.18 – SLOPE/W - Caracterização completa de jusante. ....	85
Fig. 6.19 – SLIDE - Definições do projeto de montante. ....	85
Fig. 6.20 – SLIDE - Definição do método de análise. ....	86
Fig. 6.21 – SLIDE - Definição da análise transitória. ....	86
Fig. 6.22 – SLIDE - Parâmetros de convergência para a análise estacionária. ....	87
Fig. 6.23 – SLIDE - Definição do tempo de análise. ....	87
Fig. 6.24 – SLIDE - Parâmetros de convergência do regime transitório. ....	88
Fig. 6.25 – SLIDE - Separadores. ....	88
Fig. 6.26 – SLIDE - Propriedades dos materiais. ....	88
Fig. 6.27 – SLIDE - Definição das propriedades mecânicas da Fundação 3. ....	89
Fig. 6.28 – SLIDE - Propriedades hidráulicas. ....	89
Fig. 6.29 – SLIDE - Definição das propriedades hidráulicas da Fundação 3. ....	90
Fig. 6.30 – SLIDE - Função de condutividade da Fundação 3. ....	90
Fig. 6.31 – SLIDE - Função de teor em água volumétrico da Fundação 3. ....	91
Fig. 6.32 – SLIDE - Definir condições de fronteira. ....	91
Fig. 6.33 – SLIDE - Definição da função esvaziamento. ....	92

Fig. 6.34 – SLIDE - Atribuição da condição de fronteira a montante.....	92
Fig. 6.35 – SLIDE - Atribuição da condição de fronteira a jusante. ....	93
Fig. 6.36 – SLIDE – Definição de materiais e funções de esvaziamento completas.....	93
Fig. 6.37 – SLIDE - Opções de superfícies de escorregamento.....	93
Fig. 6.38 – SLIDE - Definição das superfícies de escorregamento e incrementos dos raios.....	94
Fig. 6.39 – SLIDE - Espaçamento da grelha.....	94
Fig. 6.40 – SLIDE - Definição dos limites de montante. ....	95
Fig. 6.41 – SLIDE - Caraterização completa de montante. ....	95
Fig. 6.42 – SLIDE - Definições do projeto de jusante. ....	96
Fig. 6.43 – SLIDE - Definição das superfícies de escorregamento e incrementos dos raios.....	96
Fig. 6.44 – SLIDE - Espaçamento da grelha.....	97
Fig. 6.45 – SLIDE - Definição dos limites de montante. ....	97
Fig. 6.46 – SLIDE - Caraterização completa de jusante.....	98
Fig. 6.47 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para o instante inicial. ....	98
Fig. 6.48 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 7 dias. ....	99
Fig. 6.49 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 15 dias. ....	99
Fig. 6.50 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 30 dias. ....	100
Fig. 6.51 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 120 dias. ....	100
Fig. 6.52 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para o instante inicial. ....	101
Fig. 6.53 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 7 dias.....	102
Fig. 6.54 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 15 dias.....	102
Fig. 6.55 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 30 dias.....	103
Fig. 6.56 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 120 dias.....	103
Fig. A.1.1 – Curvas características do Núcleo.....	109
Fig. A.1.2 – Curvas características do Filtro. ....	110
Fig. A.1.3 – Curvas características do Enrocamento de Montante e Jusante. ....	111
Fig. A.1.4 – Curvas características do Enrocamento de Transição.....	112
Fig. A.1.5 – Curvas características da Fundação Tratada.....	113
Fig. A.1.6 – Curvas características da Fundação 2. ....	114
Fig. A.1.7 – Curvas características da Fundação 3. ....	115
Fig. A.2.1 – SEEP/W - Carga hidráulica para o tempo inicial e 6 horas. ....	117
Fig. A.2.2 – SEEP/W - Carga hidráulica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	118
Fig. A.2.3 – SEEP/W - Carga hidráulica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	119

Fig. A.2.4 – SEEP/W - Carga hidráulica para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	120
Fig. A.2.5 – SEEP/W - Carga hidráulica para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	121
Fig. A.2.6 – SEEP/W - Carga hidráulica para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	122
Fig. A.2.7 – SEEP/W - Carga hidráulica para 120 dias. ....	123
Fig. A.2.8 – RS2 - Carga hidráulica para o tempo inicial e 6 horas. ....	123
Fig. A.2.9 – RS2 - Carga hidráulica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.....	124
Fig. A.2.10 – RS2 - Carga hidráulica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	125
Fig. A.2.11 – RS2 - Carga hidráulica para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	126
Fig. A.2.12 – RS2 - Carga hidráulica para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	127
Fig. A.2.13 – RS2 - Carga hidráulica para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	128
Fig. A.2.14 – RS2 - Carga hidráulica para 120 dias.....	129
Fig. A.2.15 – SEEP/W - Altura piezométrica para o tempo inicial e 6 horas. ....	129
Fig. A.2.16 – SEEP/W - Altura piezométrica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	130
Fig. A.2.17 – SEEP/W - Altura piezométrica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	131
Fig. A.2.18 – SEEP/W - Altura piezométrica para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	132
Fig. A.2.19 – SEEP/W - Altura piezométrica para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	133
Fig. A.2.20 – SEEP/W - Altura piezométrica para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	134
Fig. A.2.21 – SEEP/W - Altura piezométrica para 120 dias.....	135
Fig. A.2.22 – RS2 - Altura piezométrica para o tempo inicial e 6 horas. ....	135
Fig. A.2.23 – RS2 - Altura piezométrica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	136
Fig. A.2.24 – RS2 - Altura piezométrica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.....	137
Fig. A.2.25 – RS2 - Altura piezométrica para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	138
Fig. A.2.26 – RS2 - Altura piezométrica para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	139
Fig. A.2.27 – RS2 - Altura piezométrica para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	140
Fig. A.2.28 – RS2 - Altura piezométrica para 120 dias.....	141
Fig. A.2.29 – SEEP/W - Pressões neutras para o tempo inicial e 6 horas .....	141
Fig. A.2.30 – SEEP/W - Pressões neutras para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.....	142
Fig. A.2.31 – SEEP/W - Pressões neutras para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	143
Fig. A.2.32 – SEEP/W - Pressões neutras para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	144
Fig. A.2.33 – SEEP/W - Pressões neutras para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	145
Fig. A.2.34 – SEEP/W - Pressões neutras para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	146
Fig. A.2.35 – SEEP/W - Pressões neutras para 120 dias.....	147
Fig. A.2.36 – RS2 - Pressões neutras para o tempo inicial e 6 horas. ....	147

Fig. A.2.37 – RS2 - Pressões neutras para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	148
Fig. A.2.38 – RS2 - Pressões neutras para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	149
Fig. A.2.39 – RS2 - Pressões neutras para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	150
Fig. A.2.40 – RS2 - Pressões neutras para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	151
Fig. A.2.41 – RS2 - Pressões neutras para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	152
Fig. A.2.42 – RS2 - Pressões neutras para 120 dias. ....	153
Fig. A.3.1 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 0 e 6 horas. ....	155
Fig. A.3.2 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	156
Fig. A.3.3 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	157
Fig. A.3.4 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	158
Fig. A.3.5 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	159
Fig. A.3.6 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	160
Fig. A.3.7 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 120 dias. ....	161
Fig. A.3.8 – SLIDE - Fator de segurança crítico para o tempo inicial e 6 horas. ....	161
Fig. A.3.9 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias. ....	162
Fig. A.3.10 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias. ....	163
Fig. A.3.11 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 7 dias, 15 dias e 21 dias. ....	164
Fig. A.3.12 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 30 dias, 45 dias e 60 dias. ....	165
Fig. A.3.13 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 75 dias, 90 dias e 105 dias. ....	166
Fig. A.3.14 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 120 dias. ....	167



## **ÍNDICE DE QUADROS**

QUADRO 2.1. – SÍNTESE DAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS. ....	15
QUADRO 3.1. – PERMEABILIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA .....	27
QUADRO 5.1. – CAUDAL PERCOLADO NO ESVAZIAMENTO RÁPIDO.....	71
QUADRO 6.1. – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS. ....	80





## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

a - Área da seção do tubo

A - Área da seção transversal da amostra

C - Coeficiente de forma

$D_s$  - Dimensão efetiva das partículas

E - Índice de vazios

g - Aceleração da gravidade

h - Carga hidráulica de um dado ponto ou cota piezométrica

$h_w$  - Altura piezométrica

i - Gradiente hidráulico

k - Coeficiente de permeabilidade do solo

L - Distância entre os pontos em análise

Q - Caudal percolado;

S - Área da seção transversal em estudo

t - Duração da recolha da amostra

u - Pressão neutra

z - Cota geométrica relativa a um plano de referência

$v_2$  - Velocidade da partícula

$\Delta h$  - Perda de carga

$\gamma_w$  - Peso volúmico da água

$\mu$  - Valor absoluto ou dinâmico da viscosidade do fluido



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS

O presente trabalho foca-se na comparação de análises do comportamento hidráulico e da estabilidade de uma mesma barragem de aterro realizadas por diversos programas comerciais, com o objetivo de confrontar as respetivas características, quer do ponto de vista da facilidade de utilização, quer quanto à qualidade das ferramentas de exploração dos resultados.

Para a realização das análises acima referidas, tomou-se como referência genérica a geometria e características específicas da barragem de São Domingos.

Para o efeito, procedeu-se inicialmente à realização de estudos de percolação baseados em modelações bidimensionais, o que contribuiu para uma melhor perceção do escoamento através da estrutura.

Quer a análise de comportamento hidráulico, quer a de estabilidade, foram realizadas para uma situação de esvaziamento rápido, partindo de um estado inicial correspondente ao pleno armazenamento da barragem.

É importante salientar que o principal objetivo desta dissertação consiste em comprovar que programas distintos, quando corretamente utilizados, conduzirão a soluções semelhantes. Estas soluções não têm necessariamente de corresponder à realidade, pois os dados e características adotados serviram apenas como base para a modelação do problema, tendo sido introduzidas algumas simplificações de forma a facilitar a comparação entre programas.

### 1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta dissertação estrutura-se em 7 capítulos e 3 anexos que se descrevem a seguir.

No presente capítulo é apresentado o objetivo do trabalho desenvolvido, bem como a respetiva organização.

No Capítulo 2 aborda-se os conceitos básicos sobre barragens, a sua classificação, seguindo-se a distinção dos diferentes tipos de barragens existentes, as suas principais características, apresentando-se as vantagens e desvantagens das mesmas. Ainda neste capítulo é enquadrado o modelo da barragem utilizado, a barragem de São Domingos, sendo referidas algumas considerações sobre a mesma.

No Capítulo 3 é tratado o fenómeno de percolação nos solos e os seus efeitos. Abordam-se vários temas, como a permeabilidade de solos, a lei de Darcy e a conservação de energia.

No Capítulo 4 são explorados os passos iniciais na modelação bidimensional dos problemas: a definição de geometria, a caracterização de materiais e por fim a criação da malha de análise. São explicitados os procedimentos necessários para cada um dos programas.

No Capítulo 5, é realizada a análise de comportamento hidráulico da barragem modelo para a situação de pleno armazenamento e esvaziamento rápido, sendo para isso descritos os procedimentos de modelação nos programas SEEP/W e RS2.

No Capítulo 6 é apresentada a análise de estabilidade, quer para montante, quer para jusante, com recurso aos programas SLOPE/W e SLIDE, sendo pormenorizados os passos do processo.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação e referidos trabalhos futuros que possam dar continuidade a este tema.

No Anexo I são exibidas as funções de condutividade e de teor em água volumétrico de cada elemento constituinte da barragem.

No Anexo II são apresentados os resultados, obtidos nos programas SEEP/W e RS2, da análise de comportamento hidráulico para os diferentes tempos do esvaziamento rápido. São apresentados os dados relativos à carga hidráulica, altura piezométrica e pressão neutra.

Finalmente no Anexo III, apresentam-se os resultados obtidos, nos programas SLOPE/W e SLIDE, para análise de estabilidade de montante, na situação de esvaziamento rápido.

# 2

## BARRAGENS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Pretende-se no presente capítulo descrever sucintamente o conceito de barragem, os seus tipos, assim como os elementos que a constituem.

Desde sempre o homem sentiu necessidade de construir estruturas que permitissem o armazenamento de água para os mais diversos tipos de consumo.

A imprevisibilidade do fluxo de água dos rios provoca quer inundações, quer condições de seca, pelo que a construção de barreiras físicas para a proteção e contenção de água tornou-se uma necessidade, seja para consumo das populações, seja para fins agrícolas. Atualmente estas estruturas possuem geralmente capacidades funcionais para a produção de energia elétrica, dando resposta às necessidades criadas na sequência da expansão das áreas urbanas e do desenvolvimento industrial.

Estas estruturas de engenharia apresentam riscos, sendo fundamental que, no seu dimensionamento, construção e exploração, esses riscos sejam minimizados.

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição dos diversos tipos de barragens, sendo dada especial atenção às barragens de aterro, com particular ênfase na barragem de São Domingos, que serviu de base aos desenvolvimentos realizados no âmbito da presente dissertação.

### 2.2. TIPOS DE BARRAGENS

São apresentados de seguida, sem carácter exaustivo, alguns dos tipos de barragens [1]:

As barragens em arco são estruturas de betão delgadas e curvas, localmente reforçadas com armaduras ou com cabos pré-esforçados em certas áreas.

Uma das principais vantagens deste tipo de barragem é necessitar de consideravelmente menos quantidade de betão que os demais tipos. Importa referir que a competência da sua fundação é um fator importante [2][3].

As barragens em arco podem assumir várias configurações:

- Arco simples;
- Dupla curvatura (abóbada);
- Abóbadas múltiplas.

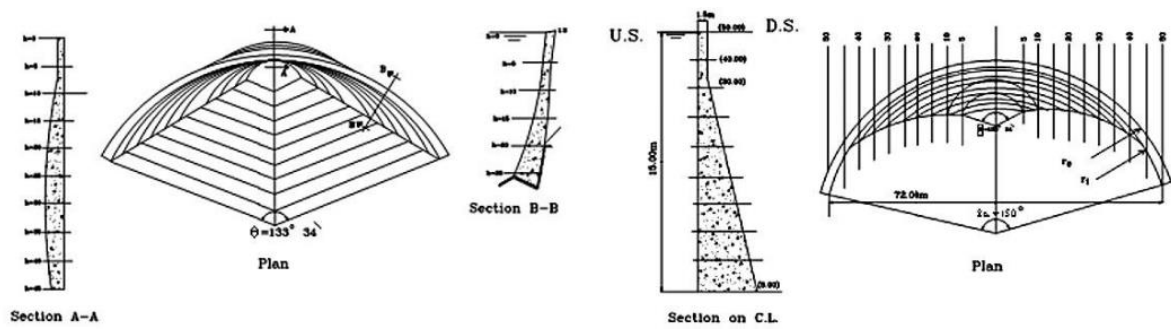


Fig. 2.1 – Barragens em arco de raio variável (esq.) e de raio constante [3].

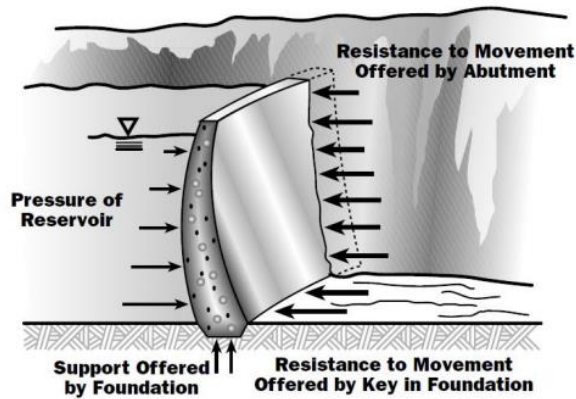


Fig. 2.2 – Barragem em arco [3].

As barragens de gravidade são estruturas de betão em que a gravidade sustem a própria estrutura, equilibrando a pressão exercida pela água do reservatório que atua na mesma.

Este tipo de barragem necessita de um grande volume de betão, sendo a qualidade e quantidade de inertes disponíveis para o seu fabrico aspetos fundamentais na conceção destas estruturas.

As razões inerentes à seleção deste tipo de solução prendem-se em situações como a proximidade de inertes para o fabrico de betão, as características da fundação, a rapidez da execução da obra. [2][3].

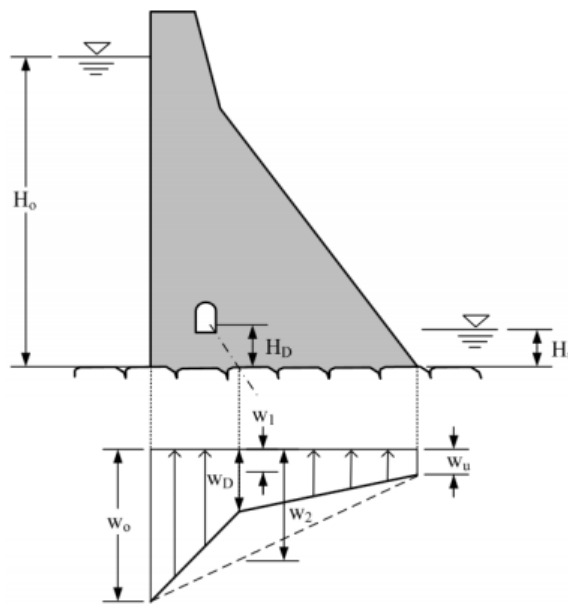


Fig. 2.3 – Seção transversal de uma barragem de gravidade [3].

As barragens de contraforte são geralmente feitas em betão e a sua estabilidade está relacionada com a transmissão de impulsos para o terreno.

O princípio por trás deste tipo de barragens é semelhante ao das barragens de gravidade, a água exerce pressão na barragem, que por sua vez, transmite a dita pressão para a fundação.

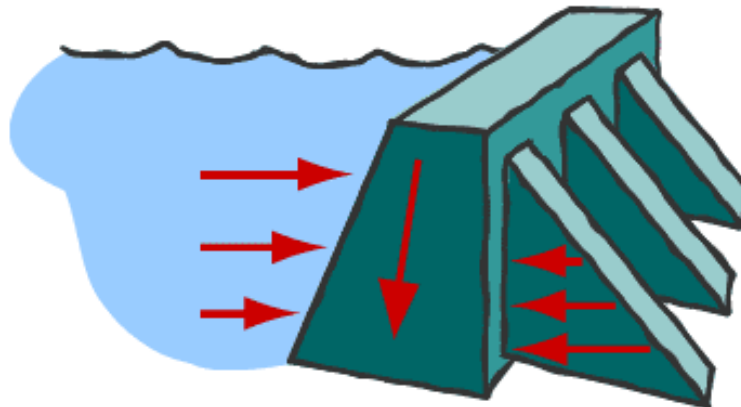


Fig. 2.4 – Representação das forças atuantes numa barragem de contrafortes [4].

A grande diferença é que esta usa consideravelmente menos material, estando este fator relacionado com o local onde a mesma irá ser construída, a configuração estrutural e os espaços vazios entre os contrafortes. No entanto necessitam de mais mão de obra qualificada, podendo assim não ser mais económicas que as barragens de gravidade.

A parede da barragem pode ser curva ou reta, a sua construção é apropriada para vales estreitos ou largos; terá apenas de ser construída em terrenos de fundação competente [2][3].

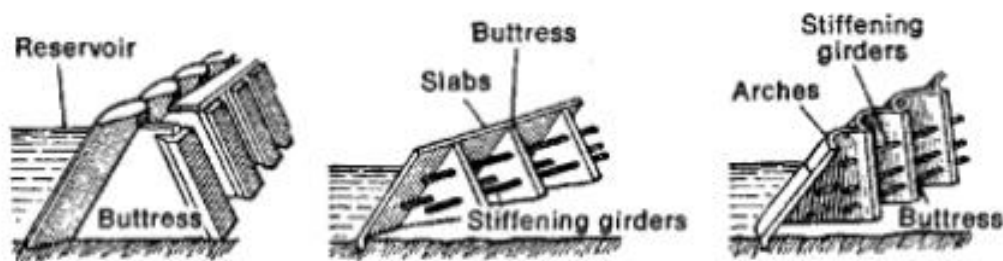


Fig. 2.5 – Exemplos de barragens de contrafortes [3].

As barragens de aterro são o tipo mais comum e mais antigo: foram construídas muito antes de ter sido inventado o betão.

Usualmente divide-se estas barragens em três grupos: de terra, de enrocamento e mistas de terra e enrocamento.

A escolha deste tipo de solução irá depender de diversos fatores como: as características da fundação, o prazo de execução, o risco de galgamento, a existência de inertes na proximidade do local de construção.

As barragens de aterro apresentam ainda uma grande desvantagem: o risco de falha/rotura, é muito superior ao das barragens de betão. Este risco terá que ser cuidadosamente analisado antes de se optar por este tipo de solução.

As barragens de terra são caracterizadas por a sua constituição ser em mais de 50% composta por materiais com dimensão de gravilha ou inferior.

As barragens de terra podem ser homogéneas ou zonadas, conforme ilustra a Fig. 2.6.



Fig. 2.6 – Exemplos de barragem homogénea (esq.) e zonada [3].

As barragens de terra homogéneas, como o próprio nome indica, são construídas usando apenas um tipo de material. Este material deve ser pouco permeável, deve permitir uma organização das partículas que não potencie a criação de caminhos de percolação depois de consolidado.

A construção destas barragens é atualmente desencorajada devido ao risco associado. A filosofia minimalista de usar o mesmo material na totalidade da barragem veio a ser substituída por outra, que inclui mecanismos de drenagem, filtros e faz uso de diferentes tipos de solo de forma a controlar a saturação e o nível freático. Nas Figs. 2.7 a 2.10 apresentam-se exemplos de barragens homogéneas complementadas pela inclusão destes elementos.



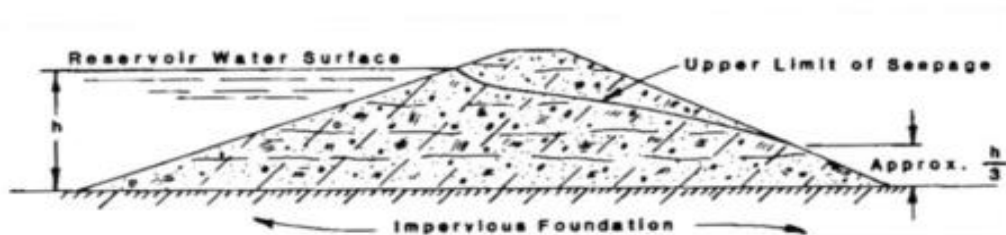


Fig. 2.7 – Seção homogénea [3].

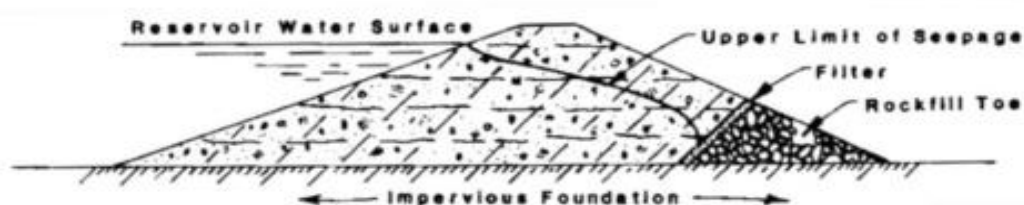


Fig. 2.8 – Seção homogénea com filtro e material rochoso [3].

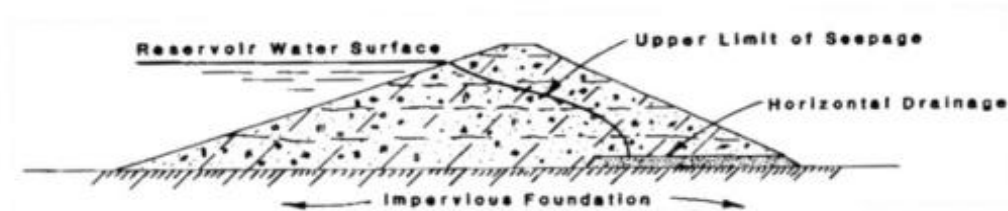


Fig. 2.9 – Seção homogénea com tapete drenante [3].

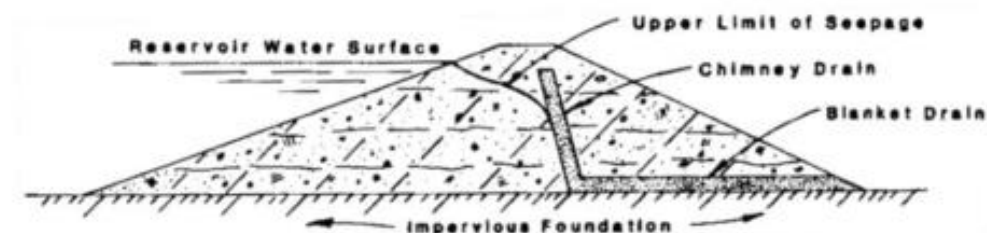


Fig. 2.10 – Seção homogénea com dreno em chaminé [3].

As barragens de terra zonadas são constituídas por um núcleo impermeável envolto por materiais geralmente mais permeáveis, com funções protetoras, estabilizadores ou mesmo drenantes.

Estas estruturas são construídas onde existem disponíveis materiais como siltes, areias, argilas e rochas.

As suas grandes vantagens estão relacionadas com a utilização de diferentes materiais em diferentes zonas, majorando assim os aspetos positivos do seu comportamento e mitigando os negativos.

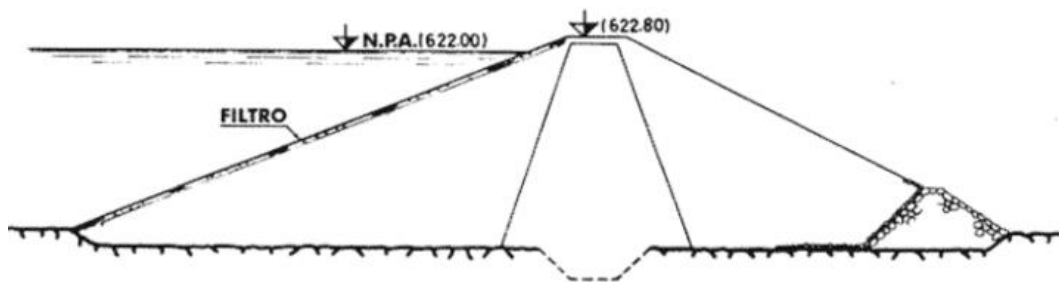


Fig. 2.11 – Barragem de terra zonada [5].

As barragens de enrocamento dependem essencialmente da rocha para assegurar a sua estabilidade estrutural.

Em semelhança às barragens de terra zonadas, estas possuem uma zona constituída por solos ou materiais betuminosos praticamente impermeáveis (o núcleo ou a face de montante), bem como filtros de materiais granulares.

Este tipo de barragem apresenta diversas vantagens económicas como: serem possíveis de construir mesmo em condições atmosféricas adversas, o processo de aplicação de materiais rochosos ser mais simples que o de betão e outros solos [2][6].

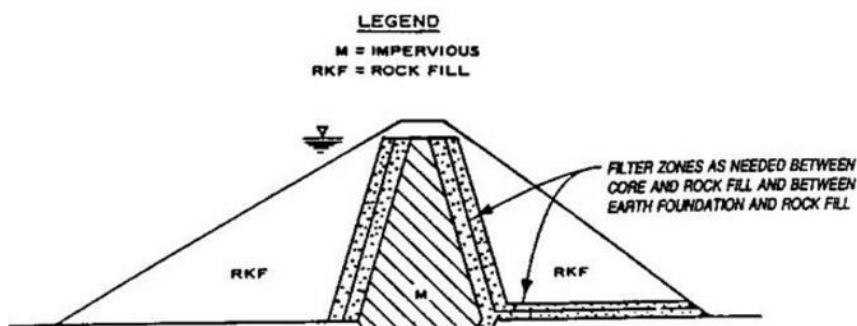


Fig. 2.12 – Barragem de enrocamento [6].

### 2.3. BARRAGENS DE ENROCAMENTO

Este tema merece especial atenção, dado que a barragem de São Domingos, que serve de referência ao presente estudo, é uma barragem de enrocamento de núcleo argiloso.

Serão feitas breves considerações, sobre este tipo de barragem, de forma a complementar a informação acima referida.

Os inertes usados na edificação destas barragens são usualmente extraídos das zonas de implantação das mesmas, sendo esta opção mais económica.

A barragem é constituída por vários elementos que irão ser descritos com mais pormenor no capítulo seguinte, podendo ser divididos em três: a estrutura de retenção ou corpo da barragem, a albufeira e todos as estruturas e elementos que controlam a passagem de água de montante para jusante [2].

### 2.3.1. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

A barragem de terra é constituída por vários materiais com propriedades diferentes e que desempenham também diferentes funções. A colocação estratégica destes materiais em diferentes zonas, majora os seus aspetos positivos, como já foi referido anteriormente.

A Fig. 2.13 ilustra de forma simples cada um dos elementos que constituem o corpo da barragem, tendo-se:

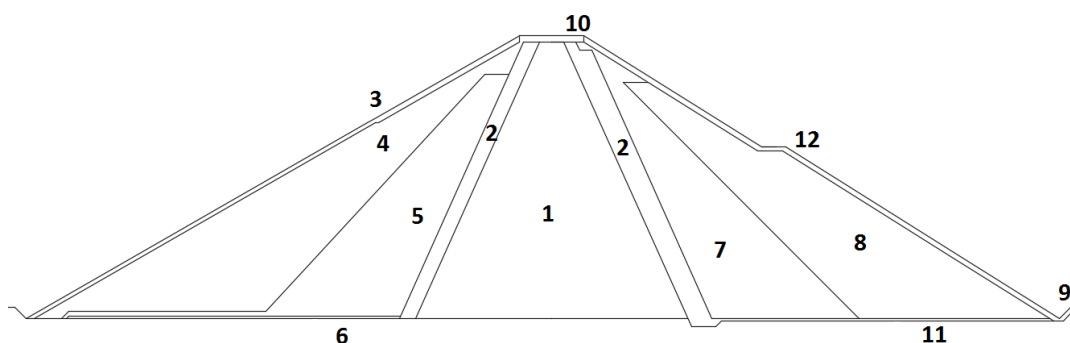


Fig. 2.13 – Elementos que constituem uma barragem de enrocamento.

1. Núcleo;
2. Filtro de chaminé;
3. Proteção do paramento de montante;
4. Enrocamento de montante;
5. Enrocamento de transição de montante;
6. Camada impermeável
7. Enrocamento de transição de jusante;
8. Enrocamento de jusante;
9. Valeta de drenagem no pé de jusante;
10. Coroamento da barragem;
11. Tapete filtrante;
12. Proteção do paramento de jusante.

O núcleo é talvez o elemento mais importante que constitui uma barragem; geralmente é composto por materiais argilosos que, devido à sua baixa permeabilidade, têm a função de minimizar a passagem da água de montante para jusante.

Os maciços de montante e de jusante têm como objetivo a estabilização da barragem, e são constituídos usualmente por materiais mais permeáveis que o núcleo.

As proteções do paramento preservam a montante o aterro contra processos erosivos devidos quer à ondulação da superfície livre da albufeira, quer ao impacto de materiais transportados, como, por exemplo, troncos de árvores, e a jusante contra a ação erosiva da chuva e do vento.

Os filtros de chaminé, situados entre o núcleo e os enrocamentos de transição, controlam a percolação da água e minimizam os riscos de fissuração.

O tapete filtrante a jusante é uma proteção situada entre o maciço estabilizador e a fundação. A sua principal função é combater o fenómeno de erosão interna e ao mesmo tempo proteger o maciço do caudal proveniente da fundação, este caudal é conduzido para o pé da barragem ou para valas transversais, caso existam.

## 2.4. MODELO DE BARRAGEM UTILIZADO

### 2.4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

O presente estudo toma como referência a Barragem de São Domingos, localizada perto da foz do Rio de São Domingos, na localidade de Atouguia da Baleia, concelho de Peniche, distrito de Leiria. Trata-se de uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, que veio colmatar as falhas existentes no âmbito do abastecimento de água à população.

Foi escolhida para a Barragem de São Domingos esta solução estrutural devido ao facto de existirem nas regiões próximas da zona de implantação materiais de aterro com características adequadas à construção e às condições geológico-geotécnicas do local, sendo assim a melhor alternativa do ponto de vista económico.



Fig. 2.14 – Localização da barragem de São Domingos.



Fig. 2.15 – Imagens aéreas da barragem de São Domingos [7].

São apresentadas de forma esquemática algumas características desta barragem, quanto a hidrologia, albufeira e barragem propriamente dita [8].

#### HIDROLOGIA

- Bacia hidrográfica – Rio de São Domingos;
- Superfície da bacia hidrográfica -  $40 \text{ km}^2$ ;
- Precipitação média anual (1925 - 1985) -  $556 \text{ mm}$ ;
- Caudal integral anual médio (1925 - 1985) -  $3,9 \text{ hm}^3$ ;
- Cheia máxima provável (PMF- Probable Maximum Flood) -  $355,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Caudal específico da cheia máxima provável -  $8,9 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$ ;
- Cheia milenária -  $224,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Volume da onda de cheia milenária -  $2,48 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;
- Cheia cinquentenária -  $145,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Volume da onda de cheia cinquentenária -  $1,57 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

## ALBUFEIRA

- Nível de máxima cheia provável (NMC) - (44,76);
- Nível de pleno armazenamento (NPA) - (42,50);
- Nível de água para cheia milenária - (NC (T1000)) (43,92);
- Nível mínimo de exploração - (22,00);
- Capacidade total de armazenamento - 7,85 hm<sup>3</sup>;
- Volume morto - 0,3 hm<sup>3</sup>;
- Superfície inundada - 95,57 ha.

## BARRAGEM

- Tipo de barragem - de enrocamento com núcleo argiloso;
- Comprimento do coroamento - 279,6 m;
- Cota do coroamento - (46,00);
- Altura máxima acima do leito - 33 m;
- Altura máxima acima da fundação - 39 m;
- Folga em relação ao NMC - 1,24 m;
- Folga em relação ao NC (T 1000) - 2,08 m;
- Largura do coroamento - 8,00 m;
- Inclinação do paramento de montante - 1,75/1 H/V;
- Inclinação do paramento de jusante - 1,60/1 H/V;
- Número de banquetas (no paramento de jusante) – 2;
- Largura das banquetas - 3,00 m; 14,50 m.

A presente dissertação reporta-se à análise do perfil tipo da barragem de São Domingos, estudando o mesmo quer a nível estrutural, quer as suas características e propriedades dos materiais.

### 2.4.2. PERFIL TIPO

Da bibliografia disponível o perfil adotado foi o ilustrado na Fig. 2.17. Trata-se de um perfil zonado constituído basicamente por um aterro central argiloso, núcleo e por maciços estabilizadores de enrocamento. A separar o material argiloso do de enrocamento existe um meio filtrante, quer a jusante, quer a montante do núcleo. Existe também um filtro a separar o enrocamento da fundação no leito do rio.

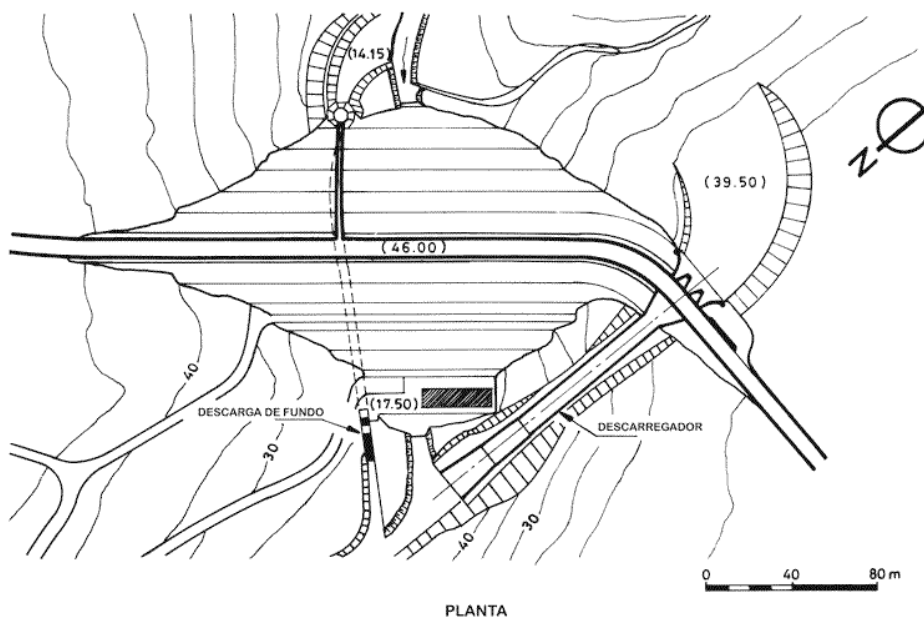


Fig. 2.16 – Planta da barragem de São Domingos [8].

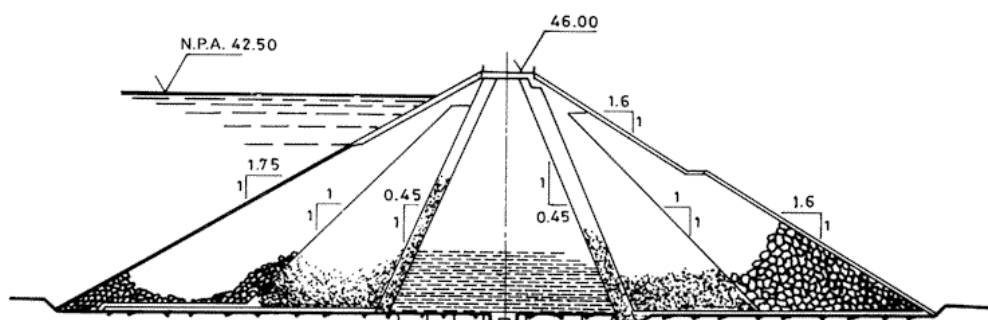


Fig. 2.17 – Perfil usado da barragem de São Domingos [8].

O maciço estabilizador de montante é constituído por duas zonas de materiais distintos; a exterior é composta por um material de qualidade superior e foi extraído da pedreira de Paço; já a zona interior é proveniente da pedreira de Bolhos.

O aterro central é constituído por materiais argilosos provenientes de manchas de empréstimo prospetadas.

Tal como o de montante, o maciço estabilizante de jusante é também constituído por duas zonas de materiais diferentes, ambos provenientes da pedreira de Bolhos.

As camadas protetoras de ambos os paramentos são provenientes da pedreira do Paço.

O perfil tipo da barragem é resultado da ponderação cuidada dos materiais disponíveis no local, e das características da obra a executar.

É importante salientar, que no âmbito deste trabalho, a escolha do perfil não é o mais importante, mas sim que este seja idêntico ao realizar a modelação aplicando os vários programas em estudo.



O primeiro passo da modelação é definir a geometria da estrutura, utilizando o perfil tipo da barragem tomada como modelo (Fig. 13). Foi utilizado o programa AutoCAD 2016 para desenhar o perfil tipo da barragem (Fig. 14) e, posteriormente foi este ficheiro exportado para os programas SEEP/W e RS2.

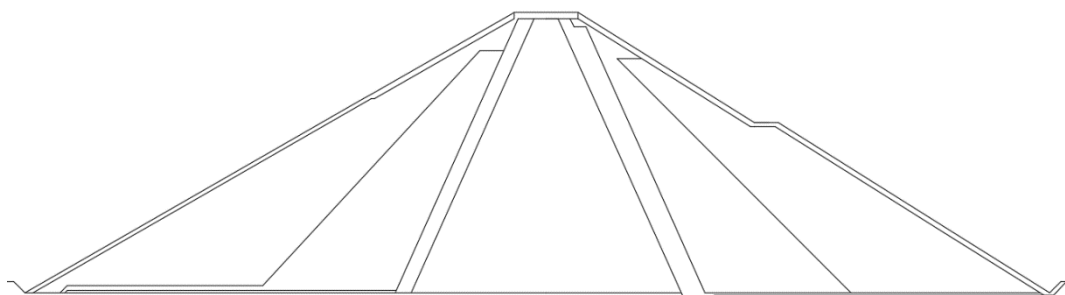


Fig. 2.18 – Perfil exportado do Autocad 2016.

#### 2.4.3. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

É necessário definir as características dos materiais utilizados na construção da barragem de aterro e existentes na fundação da mesma.

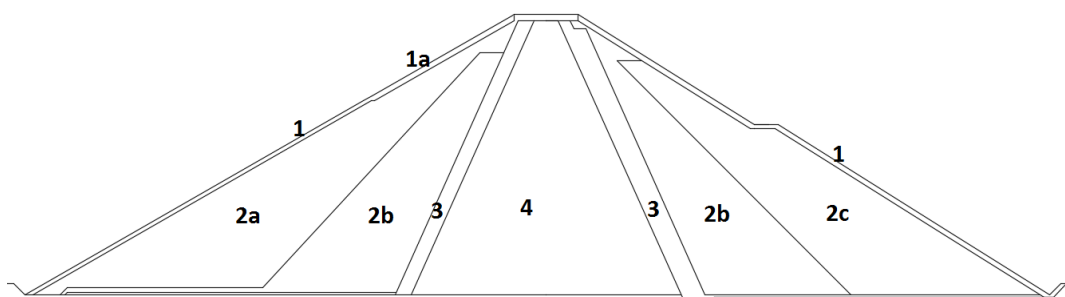


Fig. 2.19 – Materiais que constituem os elementos da barragem.

Os materiais usados na proteção do paramento de montante e jusante foram os (1a) e (1), com dimensões médias ( $D_{50}$ ), respetivamente, de 350mm e 275mm. A distribuição granulométrica destes materiais, garante que sejam cumpridos os objetivos de amortecimento do efeito erosivo do escoamento superficial no paramento de jusante.

O material (2a) é caracterizado por uma curva granulométrica extensa, com elementos de dimensão de 700mm até elementos de dimensão inferior à malha do peneiro nº 200, da série ASTM. É importante referir que depois de compactado a percentagem destes fica reduzida a 7%.

O material (2b) usado nos enrocamentos de transição, tem como função a compatibilização das dimensões dos materiais (2a) e (3), dos enrocamentos de montante, jusante e o filtro. A dimensão máxima é de 125 mm, sendo admitida a existência de uma percentagem de finos igual a 10%.

O material (3) usado como filtro, é maioritariamente areia (75%) e seixo (25%). A sua dimensão máxima é de 7mm e os finos não ultrapassam os 5%.



O núcleo é constituído pelo material (4). São usados materiais argilosos com dimensão máxima inferior a 2mm, com a percentagem de finos (dimensão inferior a 0,075mm) compreendida entre 55% e 95%, e fração argilosa sempre superior a 20%.

O material (2c) usado no enrocamento de jusante, tem na sua essência uma função estabilizadora. Tem uma curva granulométrica semelhante à do material (2a), com a dimensão máxima a variar entre 200mm e 700mm, e uma percentagem de finos depois de compactado inferior a 2%.

O tapete drenante, constituído pelo material (2b), é responsável pelo encaminhamento das águas que a ele afluem, sendo a sua permeabilidade preponderante.

Estes parâmetros relativos à granulometria foram retirados do fuso granulométrico disponível na bibliografia [8].

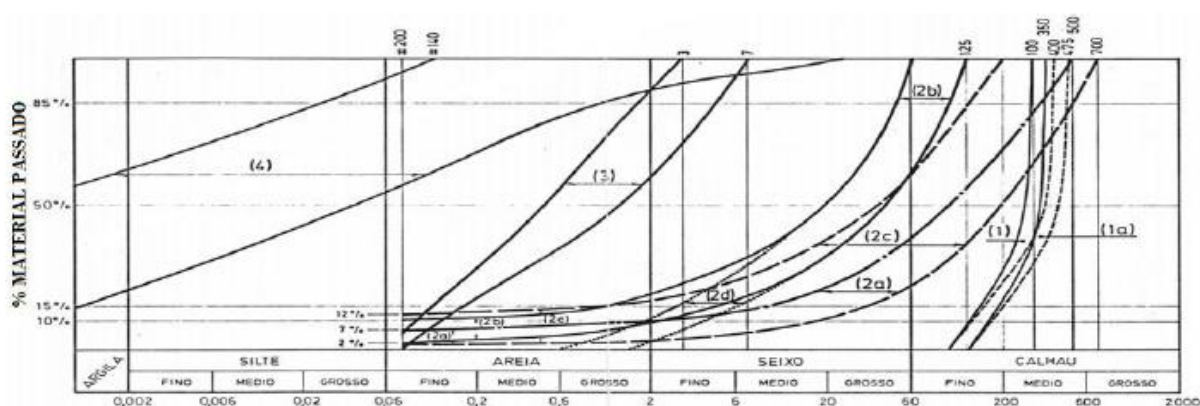


Fig. 2.20 – Fuso granulométrico dos elementos da barragem [8].

No âmbito desta dissertação, e como referido anteriormente, a permeabilidade assume um papel fulcral na análise do modelo; como tal é necessário conhecer os valores do coeficiente de permeabilidade para cada material usado na estrutura da barragem.

Outro parâmetro relevante a este projeto é a resistência; abaixo apresentam-se em síntese os valores adotados no projeto.

Quadro 2.1. – Síntese das propriedades de materiais.

Zona	Material	Peso volúmico $\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> )	Peso volúmico saturado $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão c (kPa)	Ângulo de atrito $\phi$ (°)
Enrocamento de montante	(2a)	22,6	24,2	0	45
Enrocamento de transição	(2b)	22,6	24,2	0	42

Materiais de filtro	(3)	17,5	20	0	35
Núcleo argiloso	(4)	16,6	20,6	0	30
Enrocamento de jusante	(2c)	22,6	24,2	0	42

# 3

## PERCOLAÇÃO EM SOLOS

### 3.1. INTRODUÇÃO

No que toca à existência de água nos solos é frequente distinguir três tipos consoante a sua origem: água de sedimentação, de infiltração e de condensação.

Pode-se ainda distinguir dois modos de interação com as forças eletroquímicas e gravíticas, sendo a água denominada como adsorvida ou livre. Esta dissertação irá incidir neste último tipo. A água livre estará submetida a forças gravíticas e de percolação, e o seu movimento nos meios porosos será devido à variação da energia potencial.

Tomando como referência a barragem de São Domingos, no âmbito do presente trabalho são comparados os resultados referentes ao comportamento hidráulico obtidos por diferentes programas de cálculo, pelo que no presente capítulo são revistos alguns aspetos fundamentais sobre o fenómeno da percolação em solos.

Para o estudo em questão é admitido que o solo é um meio contínuo e constituído por materiais que se podem encontrar em três estados: estado sólido (partículas de solo propriamente dito), o estado líquido (água) e estado gasoso.

Os espaços vazios estão relacionados com a porosidade do solo; estes espaços são ocupados por água e/ou ar, dizendo-se o solo saturado se ocupados por água, ou seco se ocupados por ar. Em presença da água nestes espaços criam-se redes de escoamento por onde a mesma circula, tendo esse movimento o nome de percolação.

Quando a água circula no interior de um maciço de solo exerce no mesmo forças que influenciam o seu estado de tensão. Alterações do regime de fluxo alteram os valores de pressão neutra e consequentemente de pressão efetiva.

No âmbito de percolação de água existem 3 temas a considerar: conservação da energia (Bernoulli), permeabilidade dos solos (Lei de Darcy) e conservação da massa.

### 3.2. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A água presente nos poros do solo quando submetida a gradientes de carga hidráulica entre diferentes regiões, tende a deslocar-se para os pontos de menor carga. A trajetória descrita por uma partícula designa-se por linha de corrente ou de fluxo [14].

Estes movimentos podem por em causa a segurança ou a prestação dos elementos de contenção, obras de terras ou outras estruturas hidráulicas.

Bernoulli apresenta uma proposta para a representação da carga total de um dado ponto do fluido. Num escoamento, esta carga hidráulica é dada pela expressão 3.1 [9][10]:

$$h = z + h_w + \frac{v^2}{2g} \quad (3.1.)$$

onde:

h- Carga hidráulica de um dado ponto ou cota piezométrica;

z- Cota geométrica relativa a um plano de referência;

$h_w$  - Altura piezométrica;

v- Velocidade da partícula;

g- Aceleração da gravidade.

No estudo da percolação de água em solos é habitual desprezar a última parcela, que caracteriza a energética cinética, devido à reduzida velocidade das partículas. Obtém-se assim a seguinte expressão simplificada para a carga hidráulica [14]:

$$h = z + h_w \quad (3.2.)$$

Com esta simplificação a cota piezométrica é igual à soma da altura geométrica com a altura piezométrica. Estas duas parcelas correspondem à energia potencial e ao estado de compressão da água respetivamente. A altura piezométrica é dada por (3.3) [14]:

$$h_w = \frac{u}{\gamma_w} \quad (3.3.)$$

onde:

u- Pressão neutra;

$\gamma_w$ - Peso volúmico da água.

O escoamento ocorre quando existem cargas hidráulicas diferentes entre dois pontos (A e B) distanciados por um comprimento L. Irá ocorrer então uma perda de carga  $\Delta h$ , esta perda de carga tem a seguinte expressão [14]:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (3.4.)$$

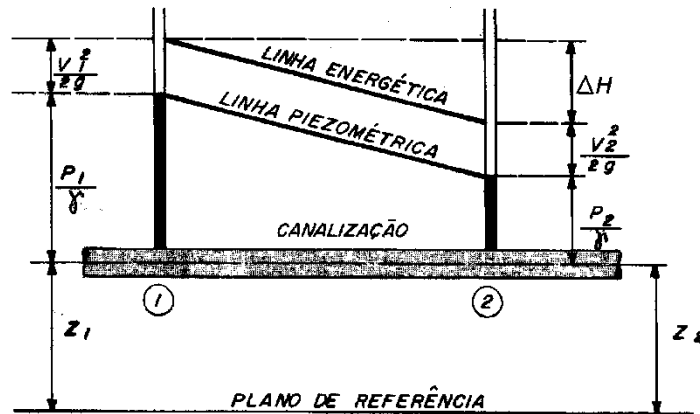


Fig. 3.1 – Perda de carga de uma partícula [16].

### 3.3. LEI DE DARCY

A lei de Darcy é uma equação que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso.

A perda de carga ao longo do comprimento  $L$ , da linha de corrente, é designada por gradiente hidráulico,  $i$ , e é dada por [14]:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.5.)$$

onde:

$i$ - Gradiente hidráulico;

$\Delta h$ - Perda de carga;

$L$ - Comprimento entre os pontos em análise.

Darcy concluiu por via experimental que é possível estabelecer uma ligação entre o caudal percolado  $Q$ , a perda de carga  $\Delta h$  entre dois pontos, a distância entre eles  $L$  e a área da secção. Chegou à expressão (3.6) conhecida como Lei de Darcy [14]:

$$Q = k \frac{\Delta h}{L} S = k i S \quad (3.6.)$$

onde:

$Q$ - Caudal percolado;

$k$ - Coeficiente de permeabilidade do solo;

$S$ - Área da secção transversal em estudo;

Ou ainda:

$$v = \frac{Q}{S} = k i \quad (3.7.)$$

É importante referir que esta velocidade é aparente ou macroscópica, resultando da divisão de um dado caudal pela área de seção do solo e admitindo uma trajetória fictícia. [11].

A lei de Darcy é apenas aplicável em casos de escoamento laminar, isto é, escoamento em que o vetor velocidade é aproximadamente constante em cada ponto do fluido e as linhas de fluxo não se cruzam.

No caso do escoamento turbulento, as partículas apresentam movimentos caóticos a nível macroscópico variando assim as suas trajetórias e velocidade. A lei de Darcy não é aplicável nestes casos.

Para fazer a distinção entre estes tipos de escoamento recorre-se ao número de Reynolds. Velocidades baixas correspondem a números de Reynolds baixos, pelo que considerar nestes casos o escoamento laminar é inteiramente legítimo [12].

### 3.4. PERMEABILIDADE DE UM SOLO

A permeabilidade do solo é um dos mais importantes parâmetros físicos e mecânicos a ter em conta em obras de engenharia civil.

A permeabilidade é uma característica intrínseca de um meio em transmitir fluidos. No caso de um solo, a permeabilidade é a propriedade que representa a maior ou menor facilidade com que a percolação da água ocorre através dos seus poros.

O coeficiente de permeabilidade,  $k$ , é o parâmetro usado para caraterizar a permeabilidade dos solos. Em resumo é o valor que representa a velocidade com que a água atravessa o solo. Este parâmetro exhibe uma gama de valores que oscila entre oito e nove ordens de grandeza, para os diversos solos.

Na Fig. 3.2 apresenta-se os intervalos de variação de  $k$  para os diferentes tipos de solos [14].

Tipo de solo	$k$ (m/s)
Seixos limpos	$> 10^{-2}$
Areia grossa	$10^{-2}$ a $10^{-3}$
Areia média	$10^{-3}$ a $10^{-4}$
Areia fina	$10^{-4}$ a $10^{-5}$
Areia siltosa	$10^{-5}$ a $10^{-6}$
Siltes	$10^{-7}$ a $10^{-8}$
Argilas	$10^{-8}$ a $10^{-10}$

Fig. 3.2 – Intervalo de variação de  $k$  para diferentes solos [14].

#### 3.4.1. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE

O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado em ensaios de laboratório, ou em ensaios *in situ*. Podem ser realizados três tipos de ensaios em laboratório para a avaliação do coeficiente de permeabilidade; são eles: ensaio com permeâmetro de carga constante, ensaio com permeâmetro de carga variável e ensaio edométrico [11].

##### 3.4.1.1. Ensaio com permeâmetro de carga constante

O ensaio com permeâmetro de carga constante faz basicamente uso do aparelho de Darcy. Pode ser usado para todos os tipos de solo embora segundo Braja M.Das seja mais adequado para materiais granulares com maior permeabilidade [13].

Este ensaio laboratorial é ilustrado na Fig. 3.3. Consiste em colocar uma amostra de solo no interior do molde cilíndrico, e é mantida constante a altura  $h$ , ajustando a quantidade de água fornecida.

A água é escoada para o interior do jarro de medição, e são medidos os tempos de recolha desta. O caudal é obtido pela Lei de Darcy tendo em conta esses mesmos tempos.

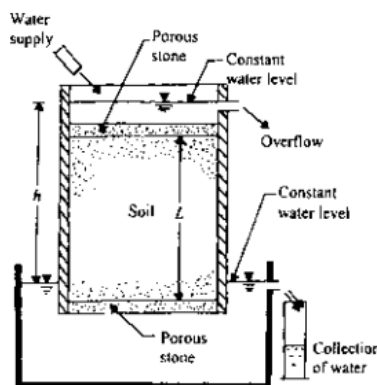


Fig. 3.3 – Ensaio com permeâmetro de carga constante [13].

Segundo a Lei de Darcy o caudal percolado  $Q$  em função do tempo é dado pela seguinte expressão [13]:

$$k = \frac{Q L}{h A t} \quad (3.8.)$$

onde:

$k$ - coeficiente de permeabilidade;

$Q$ - caudal percolado;

$L$ - comprimento;

$h$ - carga hidráulica;

$A$ - área transversal da amostra;

$t$ - duração da recolha do caudal percolado.

#### 3.4.1.2. Ensaio com permeâmetro de carga variável

Os ensaios com permeâmetro de carga variável são mais utilizados para solos finos, de grau de permeabilidade médio ou baixo [13].

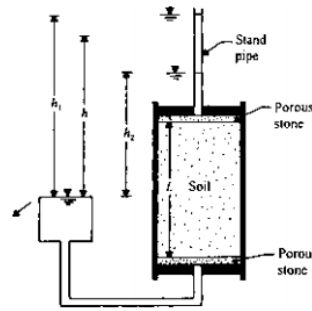


Fig. 3.4 – Ensaio com permeâmetro de carga variável [13].

Seja a perda de carga hidráulica inicial  $h_1$ , medida para  $t_i=0$ , e  $h_2$  a perda de carga hidráulica para o fim do ensaio, quando  $t_f=t$ . A diferença entre estes valores de perda de carga deve ser pequena, de forma a não se verificar uma variação significativa da velocidade de percolação durante o ensaio [14].

Admitindo  $dh$  o abaixamento do nível da água no tempo  $dt$ . O caudal escoado será:

$$q = -a \frac{dh}{dt} \quad (3.9.)$$

onde:

$h$ - Perda de carga hidráulica para um instante  $t$ ;

$a$ - Área da secção do tubo;

Aplicando a Lei de Darcy, vem que:

$$q = A k i = A k \frac{h}{L} \quad (3.10.)$$

onde:

$A$ -Área da secção da amostra do solo.

Igualando os caudais das equações 3.9 e 3.10:

$$q = -a \frac{dh}{dt} = A k \frac{h}{L} \quad (3.11.)$$

Integrando obtém-se a seguinte expressão do coeficiente de permeabilidade:

$$k = \frac{a}{A} \frac{L}{t_f - t_i} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.12.)$$



#### 3.4.1.3. Ensaio de bombagem permanente

Em certos projetos justifica-se a realização de ensaios de permeabilidade *in situ*, ensaios que envolvem grandes volumes de solo fornecendo valores médios de permeabilidade que levam em conta variações locais no solo. Por outro lado, eliminam o problema do amolgamento das amostras indeformadas e a dificuldade de amostragem oferecida por algumas formações especialmente de solos arenosos [17].

Durante o teste é bombeada água a um ritmo constante de um poço que atravessa a camada de solo a caracterizar.

São instalados no mínimo dois piezômetros na camada em estudo, em dois alinhamentos ortogonais, a uma distância ao poço que deverá ser razoável.

Quando se considerar que foi estabelecido um escoamento permanente para o poço, são medidas as alturas piezométricas nos pontos de observação.

Irão ser apresentados dois casos: escoamento não confinado e o escoamento confinado.

Para o escoamento não confinado numa camada homogénea o caudal é considerado constante, a Fig.3.5 ilustra esta mesma situação.

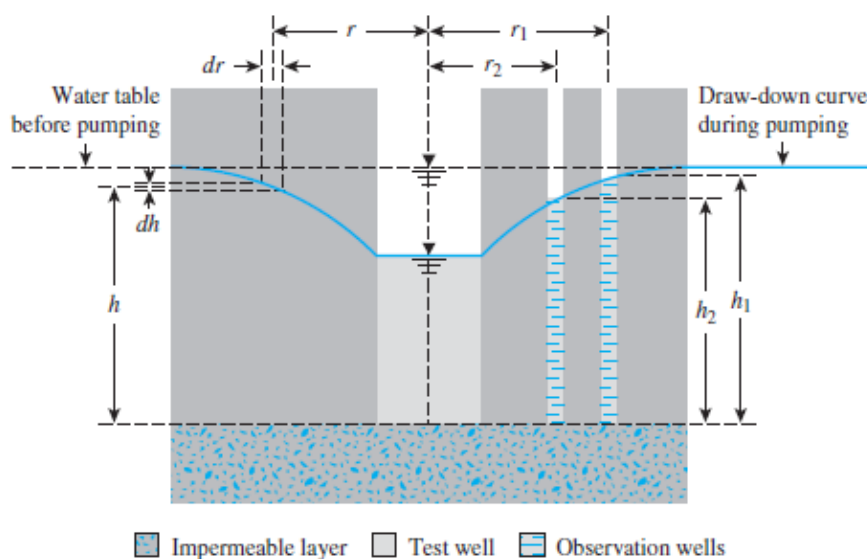


Fig. 3.5 – Escoamento não confinado numa camada homogénea [17].

Aplicando a Lei de Darcy, a expressão de caudal escoado para o poço vem [14]:

$$Q = k \left( \frac{dh}{dr} \right) 2\pi r h \quad (3.13.)$$

ou:

$$\left(\frac{dr}{r}\right) = \frac{2\pi k}{Q} h dh \quad (3.14.)$$

pelo que integrando a expressão 3.14. pode ser obtida a expressão do coeficiente de permeabilidade:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)Q}{\pi(h_1^2 - h_2^2)} \quad (3.15.)$$

O caso a que se refere a Fig.3.6 é classificado como um escoamento confinado, dado que o mesmo se processa num estrato permeável de espessura H.

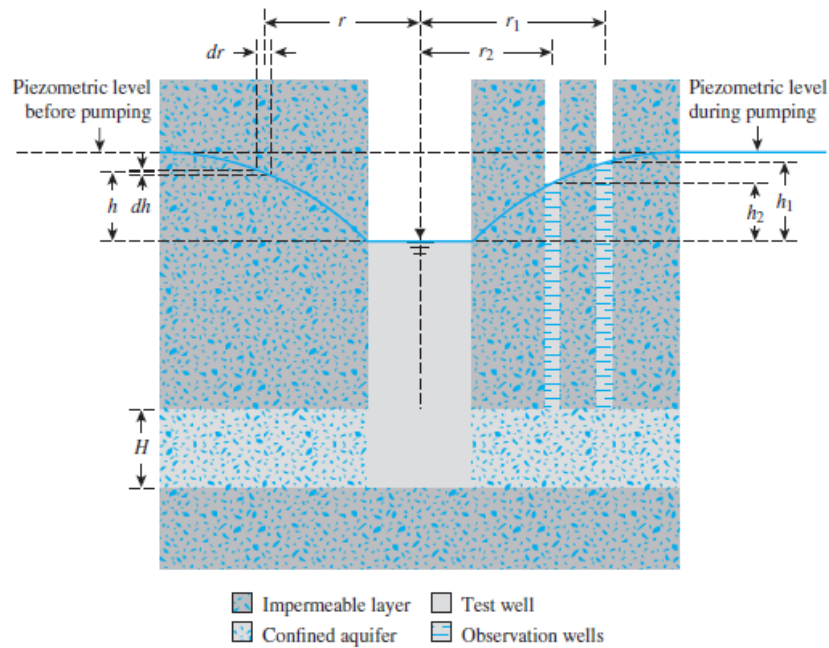


Fig. 3.6 – Escoamento confinado [17].

Novamente aplicando a Lei de Darcy, a expressão de caudal escoado vem:

$$Q = k\left(\frac{dh}{dr}\right) 2\pi r H \quad (3.16.)$$

ou:

$$\left(\frac{dr}{r}\right) = \frac{2\pi k H}{Q} dh \quad (3.17.)$$

pelo que integrando a expressão 3.17. pode ser obtida a expressão do coeficiente de permeabilidade:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)Q}{2\pi H (h_1 - h_2)} \quad (3.18.)$$

### 3.4.2. FATORES QUE AFETAM A PERMEABILIDADE

Como já foi referido anteriormente, a permeabilidade é uma das propriedades do solo com maior espectro de variação, e é função de diversos parâmetros, dependendo tanto do fluido que atravessa o meio poroso, como das propriedades do solo.

São a seguir apresentados alguns dos parâmetros que influenciam a permeabilidade de solos granulares.

#### 3.4.2.1. Granulometria

A granulometria é um dos parâmetros que mais influenciam o coeficiente de permeabilidade, dá-se especial atenção às partículas com menor dimensão [9].

Quanto maior a dimensão das partículas do solo maior irá ser a permeabilidade do mesmo, pois grãos com dimensões mais reduzidas irão ocupar espaços vazios, dificultando assim o caminho por onde a água irá escoar.

A relação da permeabilidade com a dimensão das partículas, para materiais granulares, é apresentada na expressão 3.19:

$$k = 100 \cdot D_{10}^2 \quad (3.19.)$$

onde  $D_{10}$  é o diâmetro do peneiro no qual passam 10% das partículas.

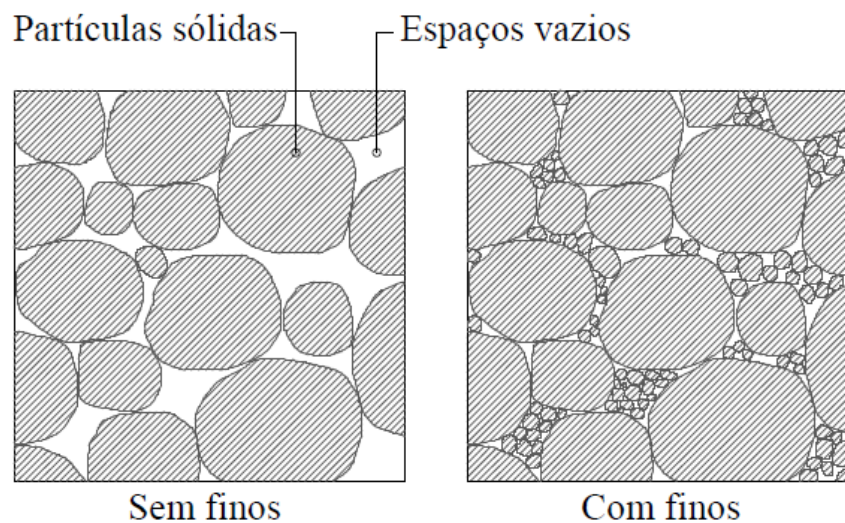


Fig. 3.7 – Granulometria de uma amostra com e sem partículas finas [9].

#### 3.4.2.2. Índice de vazios

A permeabilidade de solos granulares está relacionada com o índice de vazios, logo, com a sua porosidade. Em termos gerais quanto mais poroso o solo (maior a dimensão dos poros) maior será o índice de vazios e consequentemente a permeabilidade. Tratando-se de areias limpas e bem graduadas,

o coeficiente de permeabilidade vem em função de  $e^3/(1+e)$ , esta relação é mais adequada para solos granulares grosseiros [15].

### 3.4.2.3. Viscosidade do Fluido e Temperatura

Embora a Lei de Darcy tenha sido obtida por via experimental, foram realizadas inúmeras tentativas de alcançar resultados semelhantes analiticamente.

A expressão 3.20 tem em conta as características do fluido e outras variáveis que irão influenciar a permeabilidade [9]:

$$k\left(\frac{cm}{s}\right) = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} C \quad (3.20.)$$

onde:

$\gamma$ - peso volúmico da água;

$\mu$ -valor absoluto ou dinâmico da viscosidade do fluido;

$e$ - Índice de vazios;

$C$ - Coeficiente de forma;

$D_s$ -Dimensão efetiva das partículas.

Facilmente se percebe a importância destas características do fluido, sabe-se ainda que o peso volúmico ( $\gamma$ ) irá variar pouco com a temperatura ao contrário da viscosidade ( $\mu$ ) que irá variar significativamente:

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad (3.21.)$$

onde:

$K$ - representa o valor absoluto da permeabilidade ou a permeabilidade intrínseca, que pode ser expresso em  $cm^2$ .

A expressão 3.21 mostra que a permeabilidade é função do  $\gamma$  e de  $\mu$ , que por sua vez são função da temperatura a que o teste é conduzido, como já foi referido. Obtém-se agora a expressão 3.22:

$$\frac{k_{T1}}{k_{T2}} = \frac{\mu_{T2}}{\mu_{T1}} \frac{\gamma_{wT1}}{\gamma_{wT2}} \quad (3.22.)$$

onde:

$k_{T1}$ ,  $k_{T2}$  - coeficientes de permeabilidade à temperatura  $T1$  e  $T2$ , respetivamente;

$\mu_{T1}$ ,  $\mu_{T2}$ -viscosidade da água à temperatura  $T1$  e  $T2$ , respetivamente;

$\gamma_{wT1}$ ,  $\gamma_{wT2}$ - peso volúmico da água à temperatura  $T1$  e  $T2$ , respetivamente.

É convencional ter como referência a temperatura da água a 20°C para o cálculo do coeficiente de permeabilidade. A relação deste coeficiente a diferentes temperaturas é mostrada na expressão 3.23 [9]

$$k_{20} = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} k_T \quad (3.23.)$$

Apresenta-se no Quadro 3.1 valores da razão entre os valores da viscosidade da água para uma dada temperatura T e para 20°C.

Quadro 3.1. – Permeabilidade em função da temperatura

Temperatura, T (°C)	$\mu_T(^{\circ}\text{C}) / \mu_{20(^{\circ}\text{C})}$
15	1.135
16	1.106
17	1.078
18	1.051
19	1.025
20	1.000
21	0.975
22	0.952
23	0.930
24	0.908
25	0.887

#### 3.4.2.4. Grau de Saturação

Até agora assumiu-se que os vazios do solo eram totalmente preenchidos por água. Na natureza encontra-se com frequência solos não saturados, isto é, cujos vazios estão parcialmente preenchidos por ar.

O efeito do ar existente no solo é essencial na análise da respetiva permeabilidade, mesmo em baixas quantidades.

Por vezes é difícil obter a informação de quanto ar se encontra preso no solo. Conforme mostra a Fig.3.8, a presença de bolhas de ar obstrui os canalículos reduzindo por essa via a permeabilidade.

Em resumo, quanto maior for o grau de saturação de um solo, maior a sua permeabilidade [9].

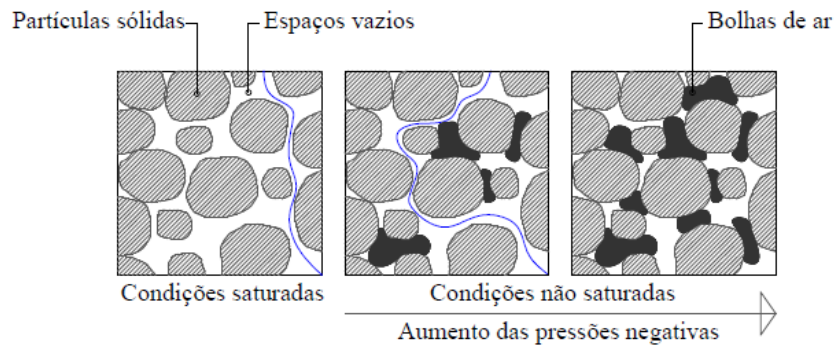


Fig. 3.8 – Alteração da permeabilidade com o grau de saturação [9].

#### 3.4.2.5. Estrutura do Solo

A estrutura do solo depende da dispersão, orientação e distribuição das suas partículas sólidas.

A estrutura é um fator influente na permeabilidade de solos finos, onde o arranjo das partículas advém da combinação de forças de atração e repulsão entre as mesmas

#### 3.4.2.6. Composição Mineralógica

Segundo Venkatramaiah a composição do solo tem pouco significado caso se trate de cascalho, areia ou silte, isto caso não esteja presente no mesmo mica ou matérias orgânicas.

No que toca a argilas, por outro lado, a composição mineralógica tem grande influência sobre a permeabilidade, sendo esta tanto menor quanto maior a atividade da argila, para um mesmo valor do índice de vazios.

A composição mineralógica pode ser usada para tornar um solo mais ou menos permeável, por exemplo, a montmorilonite é usada para tornar o solo mais impermeável [15].

#### 3.4.2.7. Permeabilidade em Maciços Estratificados

É frequente os solos apresentarem algum tipo de estratificação.

Cada camada, assumindo que homogénea, terá um coeficiente de permeabilidade associado.

A permeabilidade média do solo dependerá da direção do escoamento e da orientação das camadas do solo.

Considere-se um maciço de solo estratificado, atravessado por um caudal vertical, isto é perpendicular aos estratos, conforme mostra a Fig. 3.9:

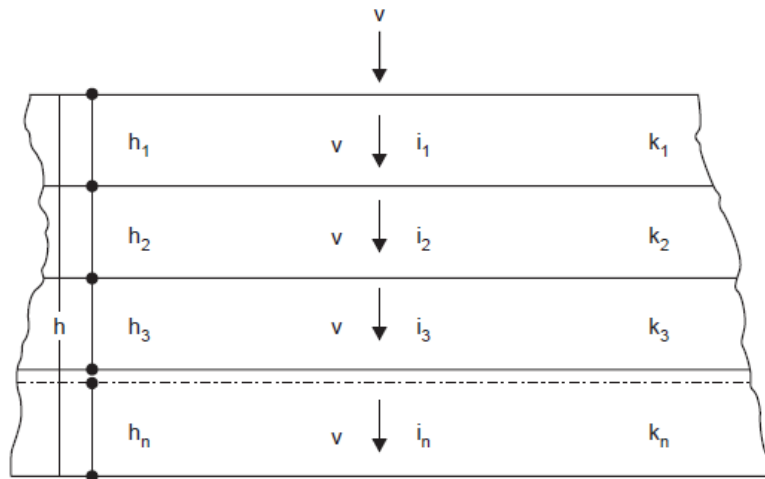


Fig. 3.9 – Percolação vertical.

onde:

$h_i$ - Espessura de cada camada, que constitui o maciço de espessura total- h;

$k_i$ - Coeficiente de permeabilidade de cada camada.

Neste caso a velocidade de percolação é a mesma para cada camada do maciço.

Considere-se ainda a perda de carga total  $\Delta h$ , e a perda de carga de cada uma das camadas  $\Delta h_i$ :

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \dots + \Delta h_n \quad (3.24.)$$

E os seguintes gradientes hidráulicos:

$$i_n = \frac{\Delta h_n}{h_n} \quad (3.25.)$$

Dado que o caudal percolado é o mesmo em todas as camadas e secção de escoamento é também igual obtém-se a expressão 3.26:

$$k_z = \frac{h}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i}} \quad (3.26.)$$

onde  $k_z$  é o coeficiente de permeabilidade vertical equivalente do maciço.

Considere-se agora o maciço atravessado por um caudal paralelo às camadas do solo, conforme mostra a Fig. 3.10:

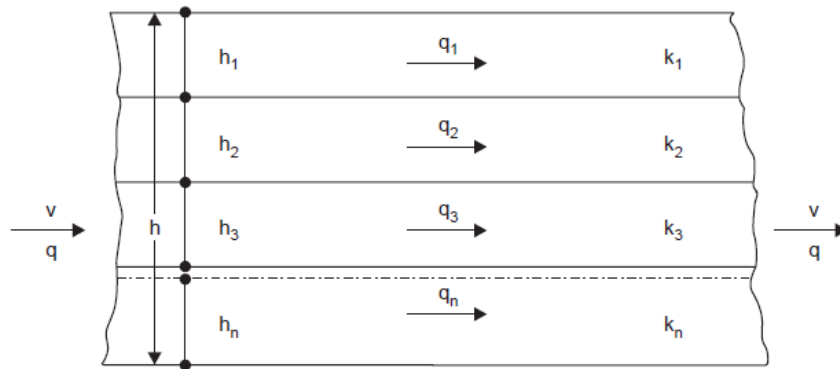


Fig. 3.10 – Percolação horizontal.

onde:

$h_i$ - Área de escoamento de cada camada;

$h$ - Área de escoamento total do solo;

$k_i$ - Coeficiente de permeabilidade de cada camada.

Dado que o gradiente hidráulico é o mesmo, o caudal total é a soma dos caudais parciais de cada camada:

$$k_x = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{h} \quad (3.27.)$$

onde  $k_x$  é o coeficiente de permeabilidade horizontal equivalente do maciço.

É importante referir ainda que  $K_x$  é sempre maior que  $K_z$  para qualquer situação, exceto para um maciço homogéneo e isotrópico em termos de permeabilidade.



# 4

## MODELAÇÃO BIDIMENSIONAL

### 4.1. INTRODUÇÃO

No âmbito desta dissertação é realizada a simulação numérica de situações passíveis de ocorrer em barragens de aterro, de tipo similar à barragem de São Domingos. Com base em modelação bidimensional é analisado o comportamento hidráulico da barragem, assim como a sua estabilidade estrutural.

O estudo de fluxo de água através do solo é crucial nos projetos de engenharia, podendo o solo estar ou não saturado e o escoamento ser em condições confinadas ou não confinadas.

A percolação de água por baixo ou através de estruturas de retenção representa uma das maiores preocupações e é alvo de estudos nesta categoria. A correta definição das condições de fronteira é tão importante como o estudo da percolação em si. Uma boa estimativa da relação entre a condutividade hidráulica e o grau de saturação do solo é essencial para a obtenção da solução do problema.

Será aplicado o Método de Elementos Finitos (MEF), método numérico amplamente utilizado para uma larga gama de modelações das características mecânicas e hidráulicas de terrenos e estruturas. Os programas usados, SEEP/W, RS2, permitem a consideração de modelos constitutivos e de cenários complexos e a obtenção de resultados com uma representação gráfica muito sugestiva, constituindo ferramentas poderosas e muito flexíveis para a análise de problemas geotécnicos muito diversificados.

De forma simplista, o MEF divide um meio contínuo numa malha de elementos simples, de dimensão e geometria regulável, consoante a precisão pretendida.

No âmbito da análise de comportamento Hidráulico serão utilizados dois programas o SEEP/W e RS2.

O SEEP/W é um programa da Geo-Slope que analisa fluxos de água através de materiais porosos. Permite a análise de diversos problemas de Engenharia Geotécnica e Hidráulica, assim como de Engenharia de Minas.

Além da análise de situações em regime permanente, o SEEP/W permite a análise de fluxos transitórios, isto é, que variam com o tempo, como no caso do esvaziamento rápido do reservatório de uma barragem de aterro.

Este problema é extremamente complexo e altamente não linear, pelo que o recurso a programas deste tipo torna-se imperativo em obras de engenharia civil em que as condições de fronteira sofram alterações com o tempo.

O primeiro passo no uso do SEEP/W é a seleção da geometria da secção em estudo, o segundo é a identificação dos materiais para cada região e o terceiro é a especificação das condições de fronteira.

Programas como este já não são vistos como instrumentos de pesquisa, mas sim como ferramentas de aplicação para a obtenção de soluções realistas.

É importante ainda salientar que o software SEEP/W é apenas aplicável para situações de fluxo que sigam a lei de Darcy.

O RS2 é um poderoso programa de análise 2D de elementos finitos desenvolvido pela RocScience, para aplicação em maciços terrosos e rochosos. Pode ser usado num largo leque de problemas, como percolação em solos, análises probabilísticas, consolidação, etc.

Utiliza métodos iterativos para prever o comportamento de estruturas quanto ao comportamento hidráulico ou mesmo possível rotura.

No âmbito desta dissertação, este programa foi escolhido para comparação dos resultados obtidos na modelação do comportamento hidráulico da barragem de aterro com os do SEEP/W.

É de notar que o RS2 permite a análise hidráulica e de estabilidade em separado, mas, como referido, apenas a primeira será alvo de estudo.

O programa permite análises de percolação em regime permanente ou variável, em solos saturados e não saturados, com cálculo de caudal percolado, e campos de gradiente hidráulico e velocidade de percolação.

## 4.2. GEOMETRIA DO MODELO

O aspeto mais importante da geometria usado neste modelo é ser a mesma nas diversas simulações, ou seja, ter as mesmas dimensões e geometria nos diferentes programas utilizados.

Foi escolhido o perfil ilustrado na Fig. 2.17, da barragem de São Domingos, como referência.

Com base nas peças desenhadas da barragem, foram obtidas as coordenadas de todos os pontos que constituem o perfil; essas coordenadas foram depois inseridas no programa AUTOCAD 2016, onde se desenhou o dito perfil. Este passo é importante pois todos os programas utilizados permitem a importação direta da geometria do modelo, através de um ficheiro DXF, eliminando assim uma fonte de possíveis discrepâncias na comparação das soluções obtidas nos mesmos.

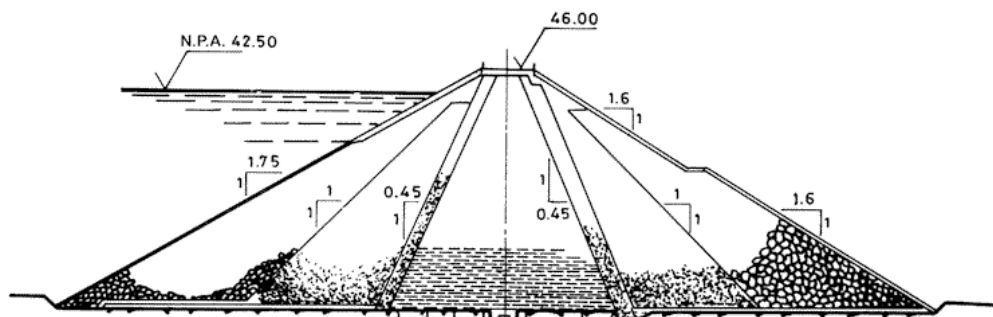


Fig. 4.1 – Perfil 7 da barragem de São Domingos.

Com base na Fig. 4.1 obtiveram-se as coordenadas de cada vértice da secção transversal da barragem tomada como referência para este estudo. O desenho da geometria final obtido no AUTOCAD 2016 é apresentado na Fig. 4.2.

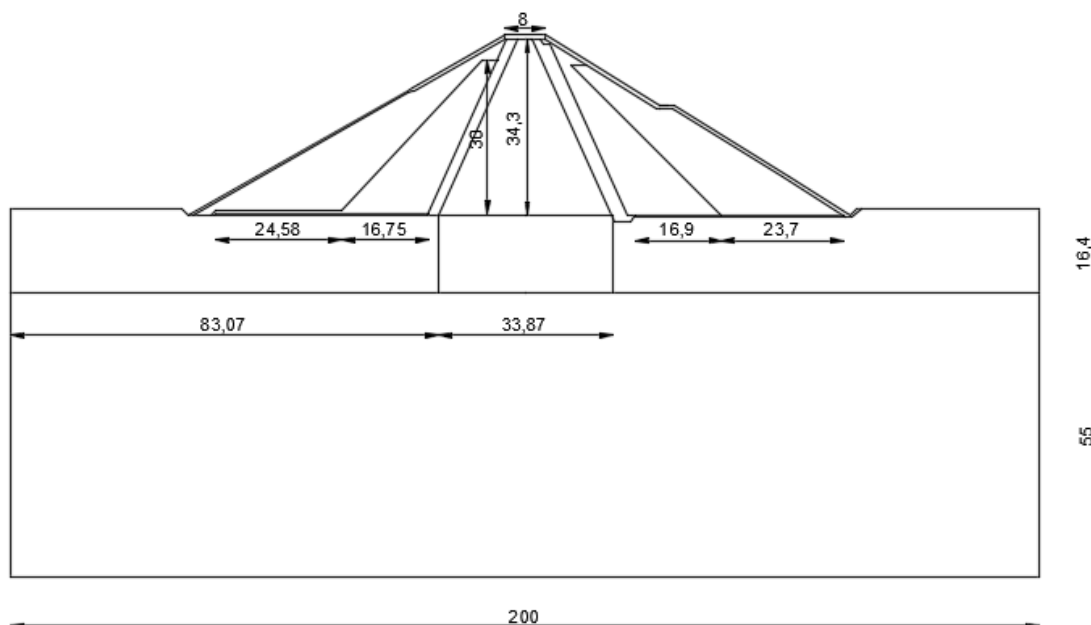


Fig. 4.2 – Dimensões do perfil modelo.

Relativamente à geometria, realça-se que foram usadas duas camadas de fundação, e uma secção de fundação tratada. É importante contemplar o estudo da fundação numa barragem de aterro pois esta é determinante no caudal que passa de montante para jusante.

Foi guardado o ficheiro em formato DXF para posterior importação nos programas usados.

Embora todos os programas tenham esta opção de importação, é necessário no RS2 e no SLIDE definir ainda as *Boundaries* para depois definir os materiais e suas propriedades; nestes dois programas o ficheiro importado irá apenas definir a o contorno exterior (add External).

### 4.3. DEFINIÇÃO DE MATERIAIS

#### 4.3.1. SEEP/W

É importante salientar novamente, que no âmbito desta dissertação o mais importante não é as características dos materiais serem rigorosamente iguais às reais usadas na barragem de São Domingos, mas sim que estas características sejam as mesmas nos diversos programas utilizados.

A caracterização dos materiais e os campos a preencher é feita de forma diferente nos diferentes programas. Serão apresentados os passos necessários ao processo em cada caso.

No SEEP/W é utilizado o menu *KeyIn*, e o botão *Materials*, para proceder à sua definição. Este menu cria modelos de materiais que podem ser aplicados em regiões ou contornos da geometria.

Neste programa são inseridos os dados relativos à condutividade hidráulica

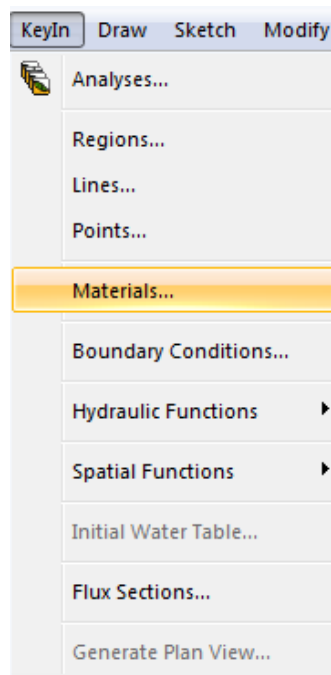


Fig. 4.3 – SEEP/W - Introduzir materiais.

São então definidos os diferentes materiais que constituem a barragem. A cada região será atribuído o correspondente material. Se for selecionada a opção *None* para uma região, esta apresentará a cor cinzenta clara e será ignorada quando for feita a análise no *Solver*.

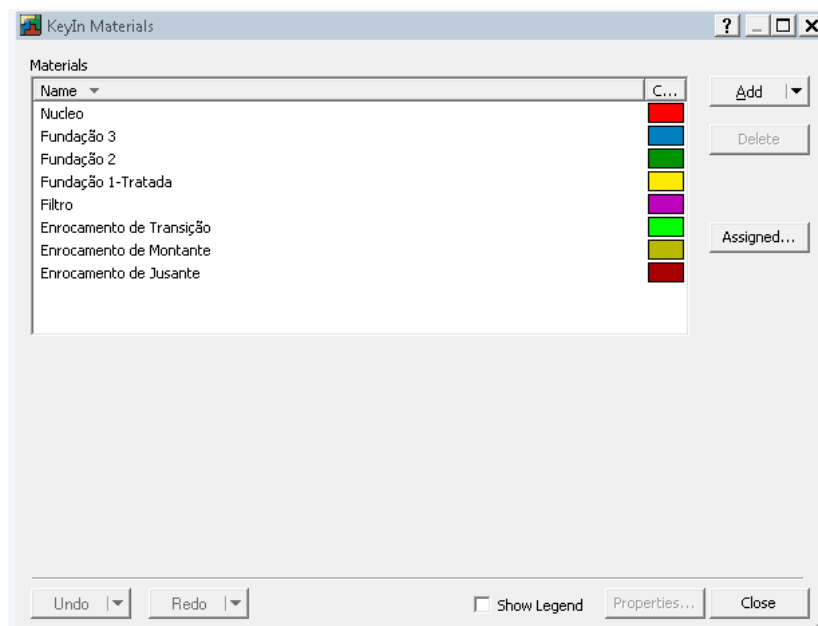


Fig. 4.4 – SEEP/W - Criação de materiais.

Como exemplo é feita em seguida a caracterização do material usado no enrocamento de montante, sendo nos anexos fornecidos os dados relativos aos restantes materiais.

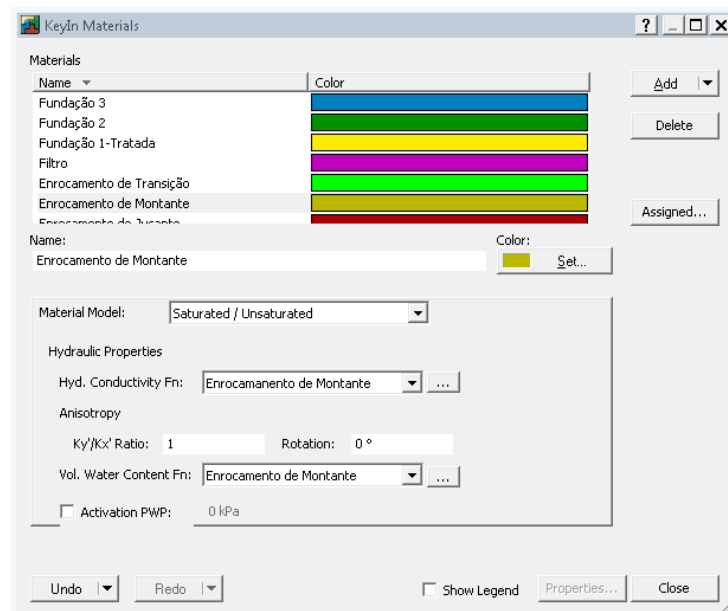


Fig. 4.5 – SEEP/W - Definição do enrocamento de montante.

Em todas as simulações é considerada a isotropia de permeabilidade do solo; considera-se que o rácio é igual a 1 e o ângulo de rotação igual a 0°.

É necessária a definição da variação com a pressão positiva na água dos poros, quer da condutividade hidráulica, quer do teor em água volumétrico. A primeira é uma das características a definir quando a saturação do solo varia ao longo do tempo. A segunda é especialmente necessária na análise ao longo do tempo de situações de esvaziamento ou enchimento da barragem.

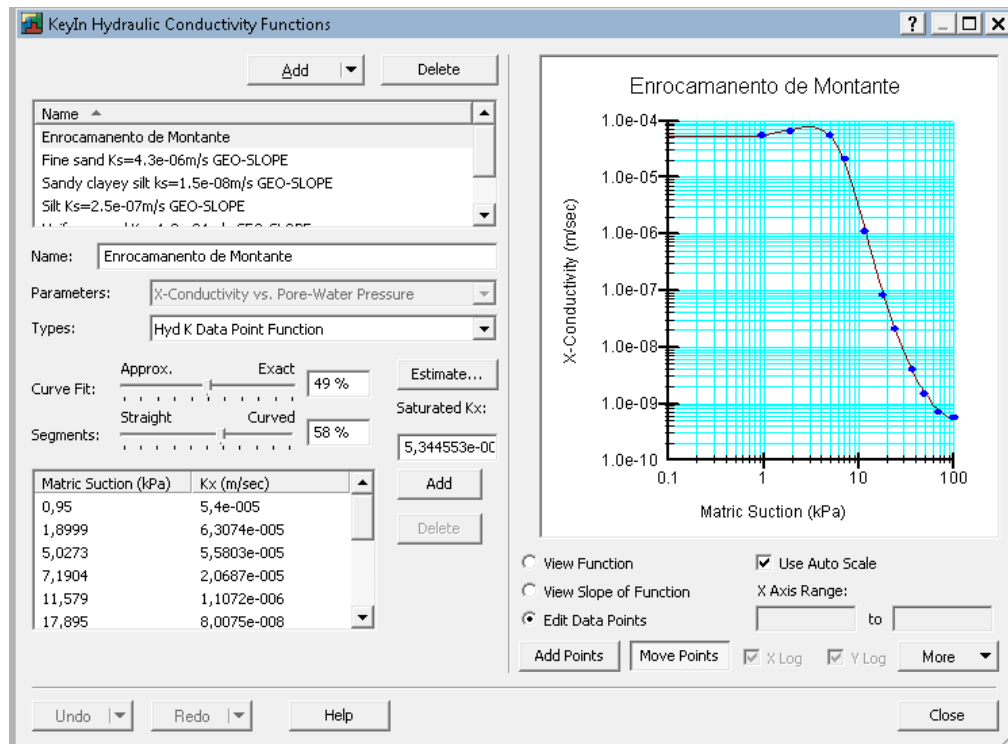


Fig. 4.6 – SEEP/W - Função de condutividade hidráulica do enrocamento de montante.

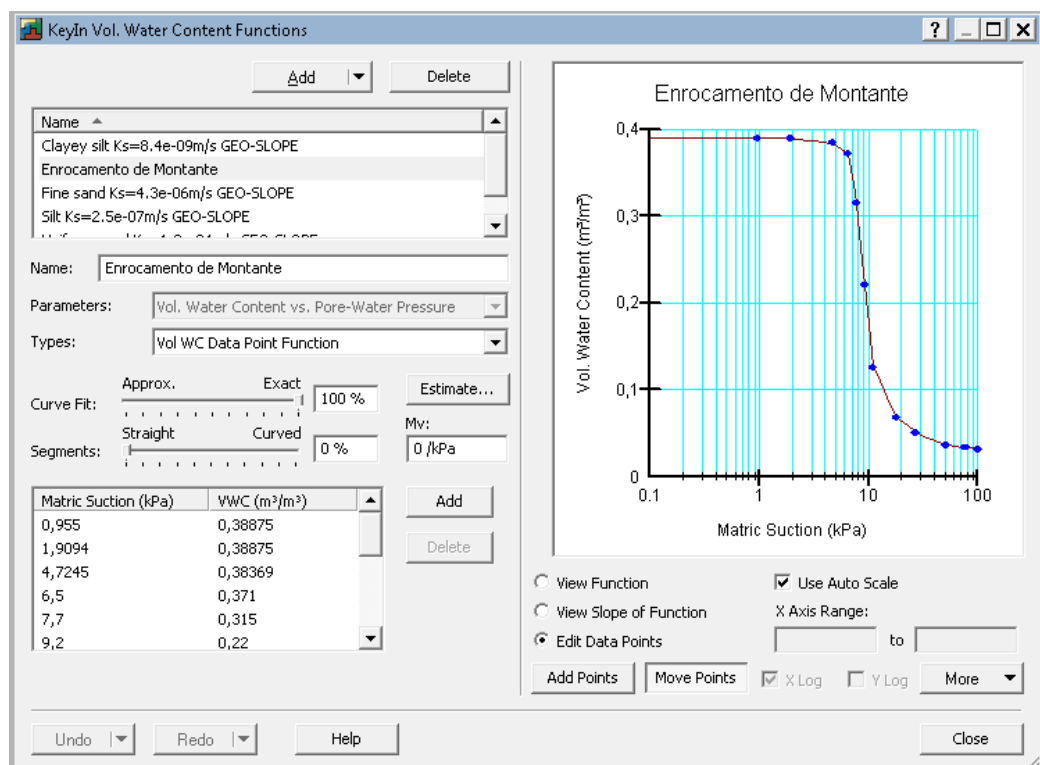


Fig. 4.7 – SEEP/W - Teor em água volumétrico do enrocamento de montante.

O programa permite a importação de definições de materiais de outros modelos pré-definidos, com eventual ajuste das curvas de condutividade ponto a ponto.

Este processo é repetido para os demais materiais constituintes da barragem.

Após definidos todos os materiais, resta apenas atribuir a cada região o respetivo material. Este procedimento é descrito na Fig. 4.8.

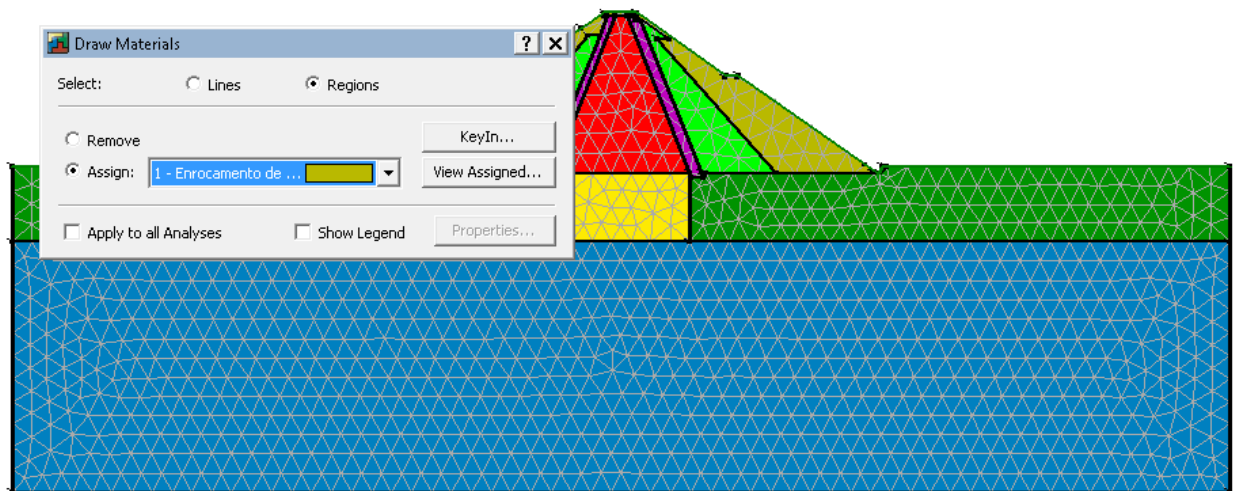


Fig. 4.8 – SEEP/W - Atribuição de materiais.

Ficam assim definidos todos os constituintes da barragem no SEEP/W.

#### 4.3.2. RS2

Será agora apresentado o processo de caracterização dos materiais no programa RS2.

As curvas de condutividade hidráulica e de teor em água volumétrico foram exportadas do programa SEEP/W para Excel, e em seguida importadas para o RS2 de forma a garantir que as condições da simulação sejam o mais semelhantes possível.

Depois de importado o ficheiro DXF para o RS2, é necessário a caracterização dos constituintes da barragem à semelhança do programa SEEP/W, no entanto antes, é preciso identificar as regiões de cada material.

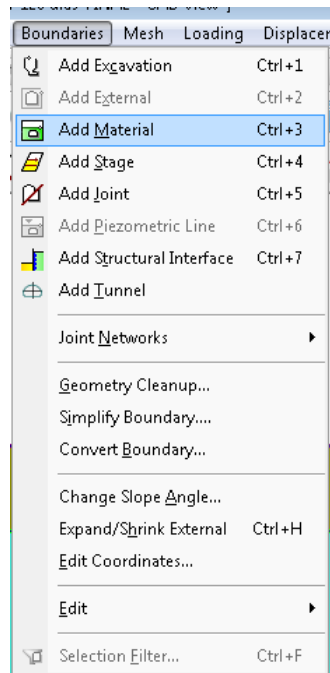


Fig. 4.9 – RS2 - Adicionar materiais.

No menu *Boundaries* é seleccionada a opção *Add Material*, e desenhada o limite de cada uma das regiões. Sendo os contornos exteriores da geometria a camada exterior por definição.

O programa RS2 permite definir tanto as características mecânicas como hidráulicas dos materiais, embora para a análise de percolação apenas as últimas sejam relevantes.

Tal como para o SEEP/W, serão descritos de seguida os passos necessários a caracterização dos materiais no RS2.

Para poderem ser inseridas as funções de condutividade hidráulica e de retenção é preciso primeiro seleccionar a análise *Uncoupled* no menu *Project Settings*.



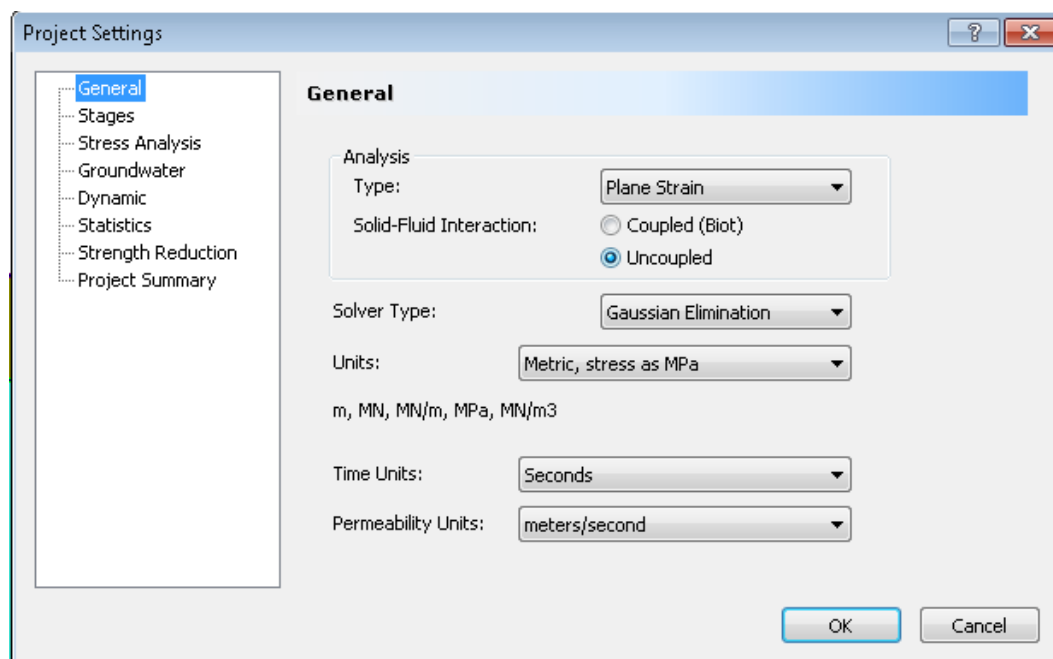


Fig. 4.10 – RS2 - Propriedades, interação sólido-fluido desacoplada.

Depois carregando com o botão direito do rato na região a definir temos acesso ao menu da Fig. 4.12..

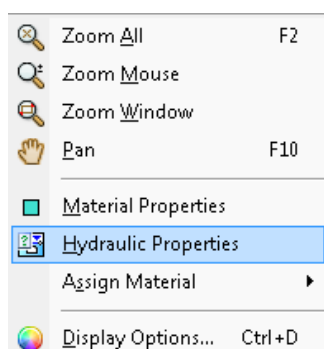


Fig. 4.11 – RS2 - Propriedades hidráulicas.

São definidas as características do enrocamento de montante como exemplo. É de salientar que os parâmetros inseridos serão os mesmos que os do SEEP/W.

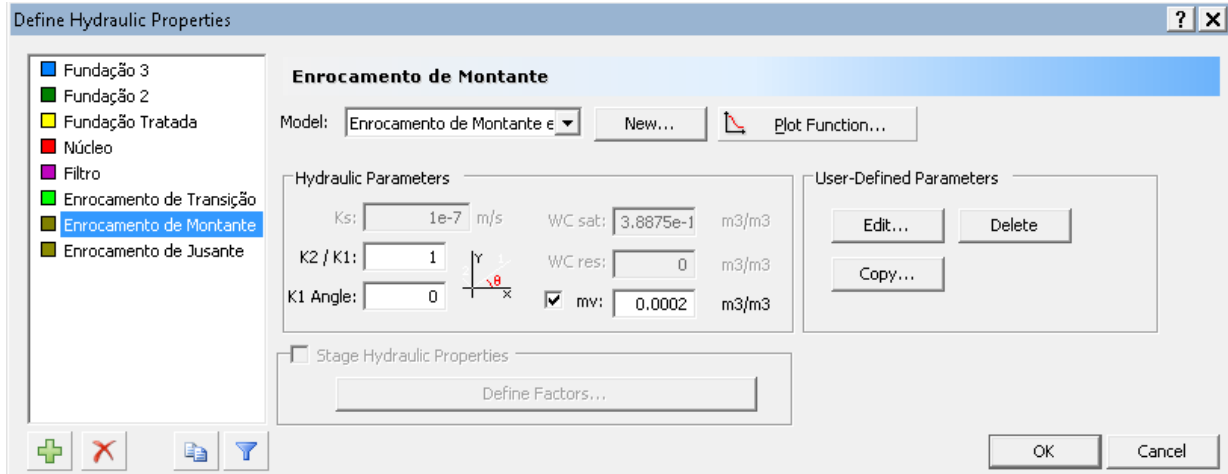


Fig. 4.12 – RS2 - Definição do enrocamento de montante.

São seleccionados os parâmetros de anisotropia iguais aos do SEEP/W, rácio  $K2/K1$  igual a 1 e o ângulo de rotação igual a 0.

Seleccionando o botão *Edit*, é inserido os valores das ordenadas e abcissas exportadas do gráfico da função de condutividade usada no SEEP/W.

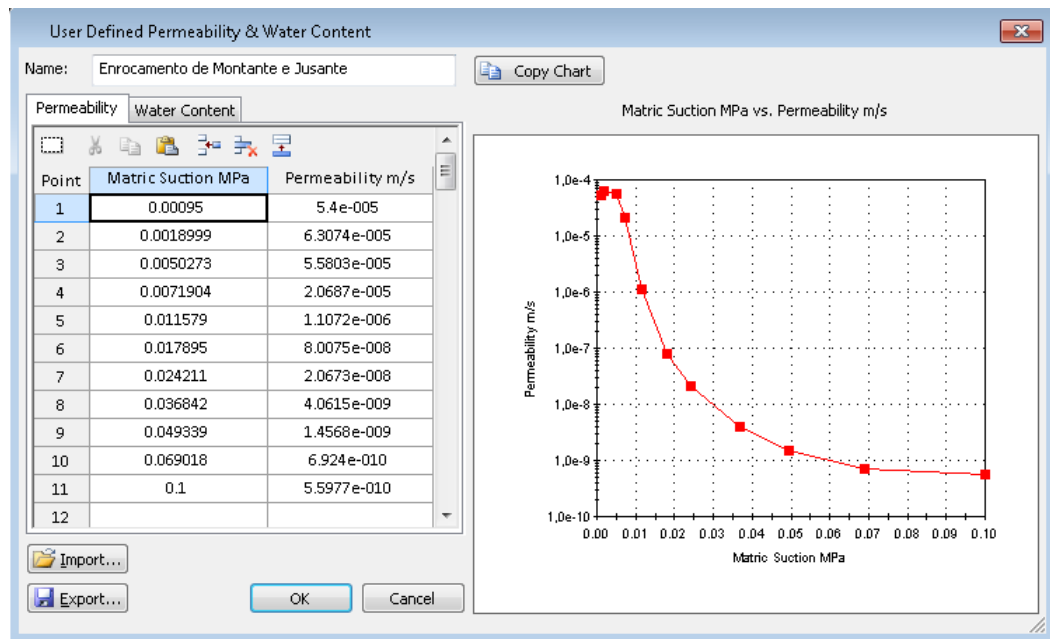


Fig. 4.13 – RS2 - Função de condutividade hidráulica do enrocamento de montante.

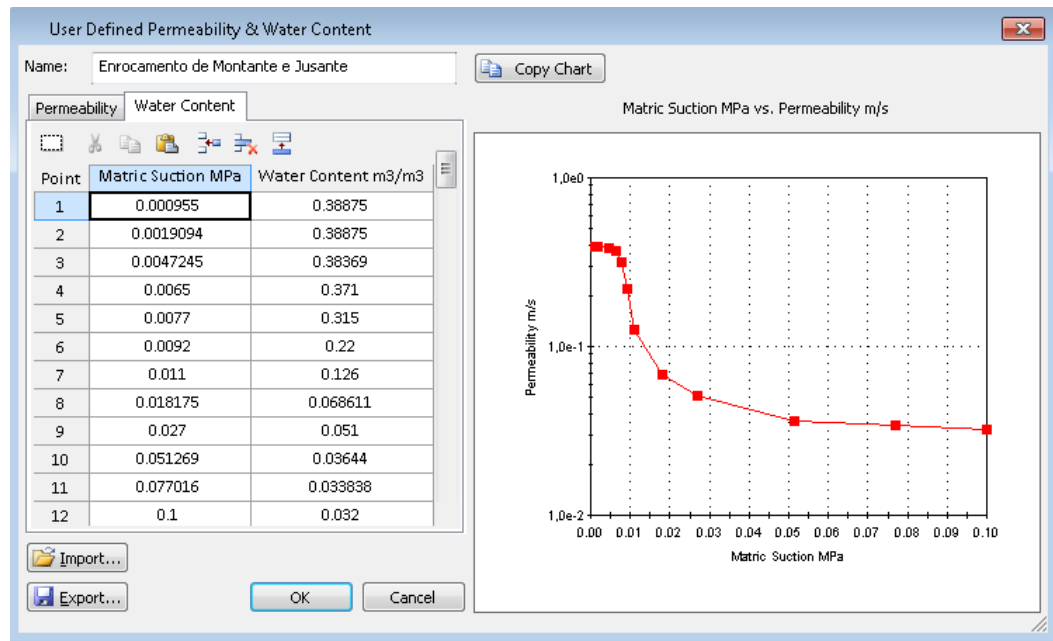


Fig. 4.14 – RS2 - Teor em água volumétrico do enrocamento de montante.

A inserção dos valores para a função de teor em água volumétrico é semelhante ao da função de condutividade hidráulica ou permeabilidade.

Estes procedimentos são repetidos para os demais materiais constituintes da barragem.

O próximo passo é atribuir a cada região os materiais criados, para isso é utilizada a opção *Assign Material*.

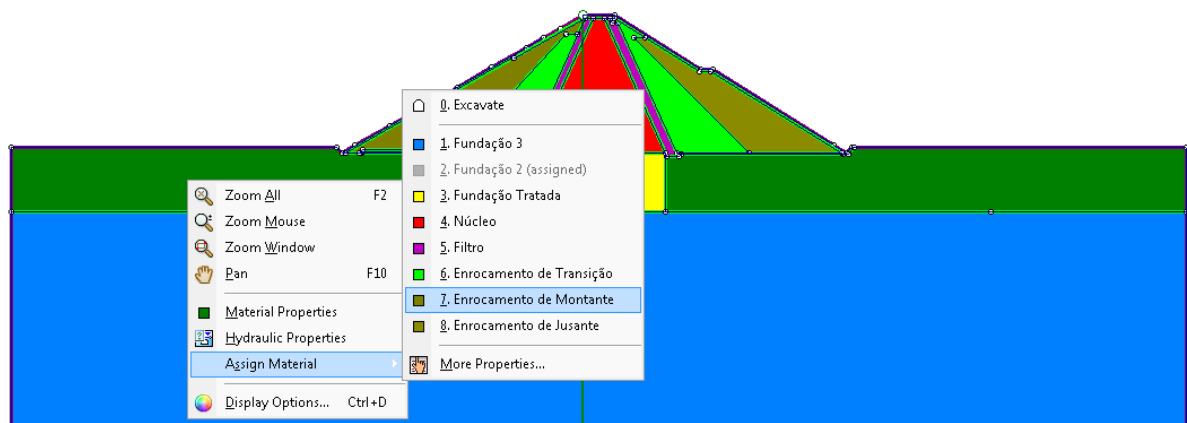


Fig. 4.15 – RS2 - Atribuição de materiais.

Estão assim definidos e caracterizados todos os constituintes da barragem. Nesta modelação foi considerado que o enrocamento de montante e jusante têm as mesmas características, de forma a simplificar a modelação.

Nas simulações realizadas é considerada a existência de uma camada impermeável a montante, de características iguais às do núcleo argiloso.

Ambos os programas são de fácil manipulação no que toca à caracterização de materiais e apresentam as mesmas opções no que toca à modelação para análises de comportamento hidráulico.

#### 4.4. DEFINIÇÃO DA MALHA

Em ambos os programas é necessária a criação de uma malha para a análise de percolação. De forma semelhante ao que foi feito anteriormente serão descritos os passos necessários à criação da mesma nos programas SEEP/W e RS2.

##### 4.4.1. SEEP/W

Os programas da GeoStudio geram automaticamente uma malha de elementos finitos no interior das regiões e ao longo dos seus contornos. A malha é necessária para chegar a uma solução para a análise em questão. O menu *Draw Mesh Properties* permite modificar os elementos da malha consoante o nível de exigência do utilizador.

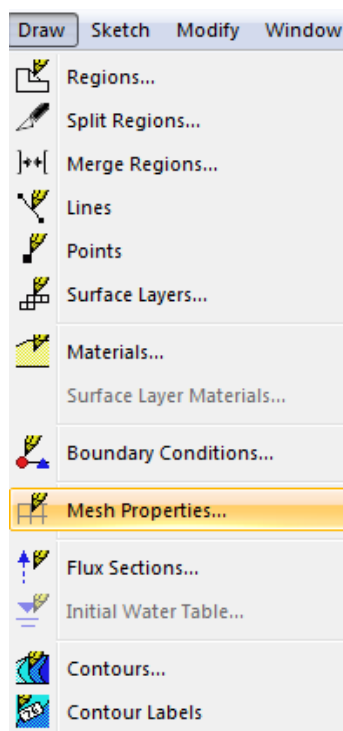


Fig. 4.16 – SEEP/W - Propriedades da malha.

No âmbito desta dissertação foram escolhidos os parâmetros da malha exibidos na Fig. 4.17, sendo assim a malha constituída por elementos triangulares de 3 nós.

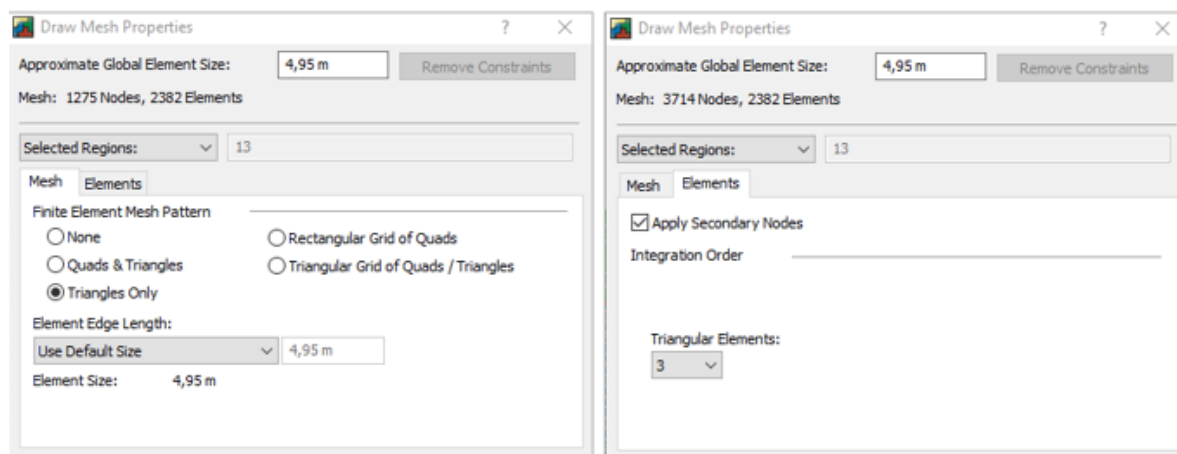


Fig. 4.17 – SEEP/W - Definição da malha.

A malha será, como referido, constituída por elementos triangulares com cerca de 4,95m de lado, num total de 2382 elementos ao longo de toda o domínio. Esta geometria e dimensão permite obter resultados razoáveis.

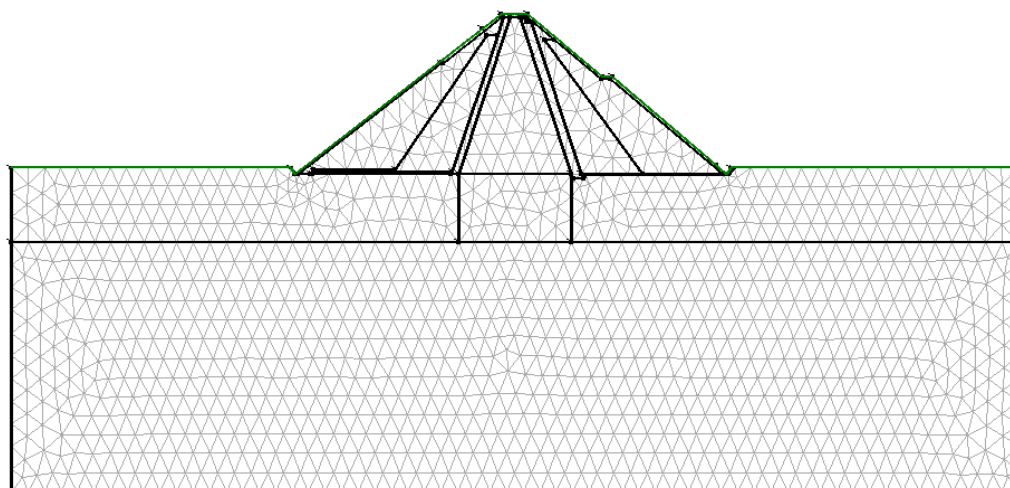


Fig. 4.18 – SEEP/W - Malha.

#### 4.4.2. RS2

O processo de definição da malha é bastante semelhante no software RS2, os passos para a caracterização da mesma serão exibidos de seguida.

No menu *Mesh* pode ser personalizada a malha desejada, o tipo e número de elementos que a constituem e aumentar ou diminuir com extrema facilidade a densidade da mesma.

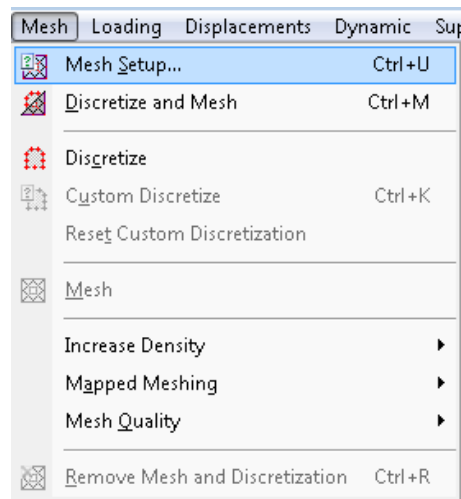


Fig. 4.19 – RS2 - Propriedades da malha.

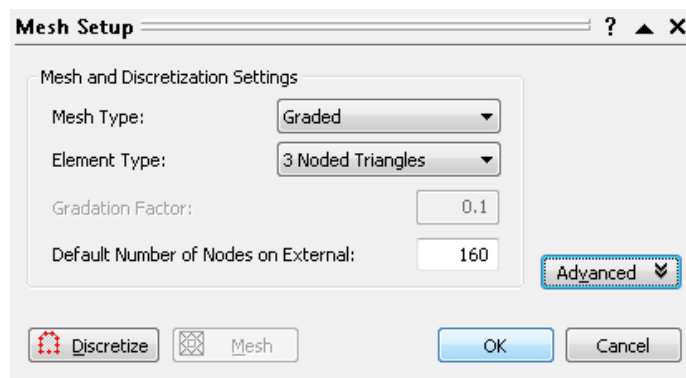


Fig. 4.20 – RS2 - Definição da malha.

Como foi referido, foram escolhidos elementos triangulares de 3 nós à semelhança do que foi feito no programa SEEP/W, uma vez mais com o intuito de serem as simulações o mais semelhante possível. Da escolha do número de nós no contorno exterior irá resultar o número de elementos que constituem a malha. Neste caso chegou-se a uma malha com 2488 elementos e 1325 nós, números bastante próximos dos obtidos no software SEEP/W, podendo esta informação ser consultada no menu *Info Viewer*.

Escolhidas as definições da malha procede-se à discretização e geração da mesma.

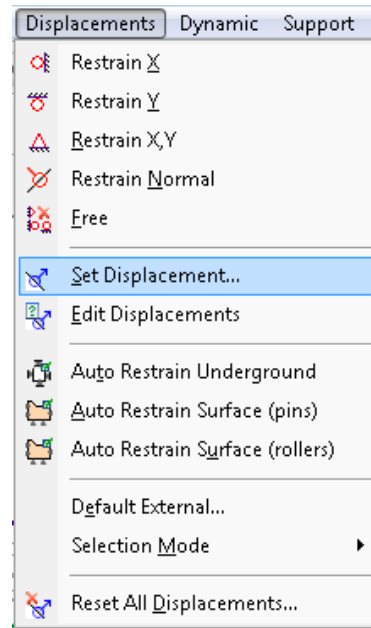


Fig. 4.21 – RS2 - Definir deslocamentos.

São restringidos os deslocamentos horizontais (com apoios simples) nos limites laterais da geometria da barragem, e os deslocamentos horizontais e verticais na base (apoios duplos). Estas definições resultam na Fig. 4.22.

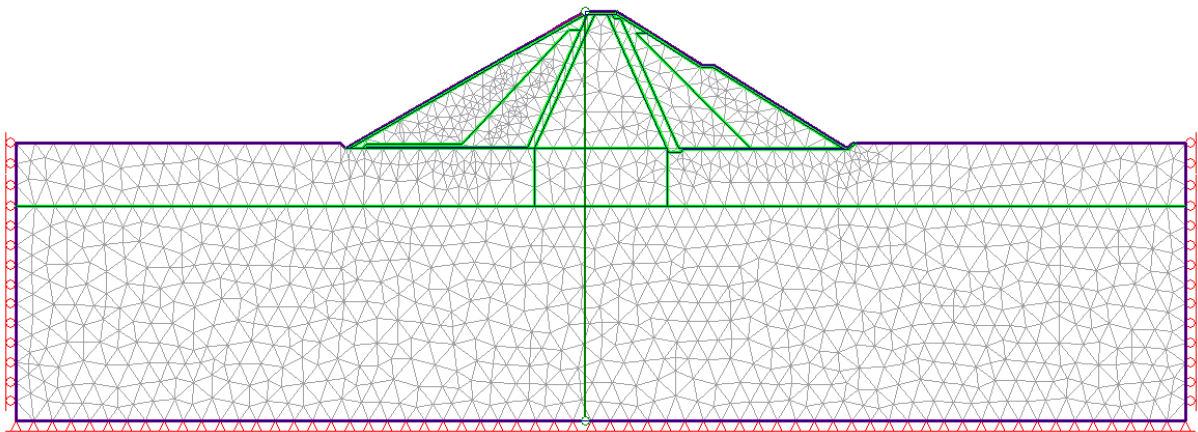


Fig. 4.22 – RS2 - Malha e deslocamentos definidos.





# 5

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

### 5.1. INTRODUÇÃO

Será feita a modelação do comportamento hidráulico da barragem nos programas SEEP/W e RS2 para a situação de pleno armazenamento, em que o nível de água a montante é igual a 42,5 m e a jusante de 12,6 m.

A geometria, propriedades dos materiais e malha utilizadas são as descritas no capítulo anterior. No presente capítulo será explicado o procedimento para a modelação deste caso de pleno armazenamento. Serão exibidos os procedimentos para cada programa e no fim serão comparados os resultados em paralelo.

### 5.2. PLENO ARMAZENAMENTO

#### 5.2.1. SEEP/W

No programa SEEP/W, o primeiro parâmetro a definir é o tipo de análise, que será *Steady-State* para o caso do pleno armazenamento. Este tipo de análise é feito para um determinado momento no tempo, sendo importante referir que esta análise não considera o tempo que demora a serem alcançadas as condições correspondentes ao estado considerado. Apenas se pretende a análise do comportamento do solo para um dado conjunto de condições de fronteira, partindo do princípio que estas são as mesmas desde sempre e sempre se manterão iguais.

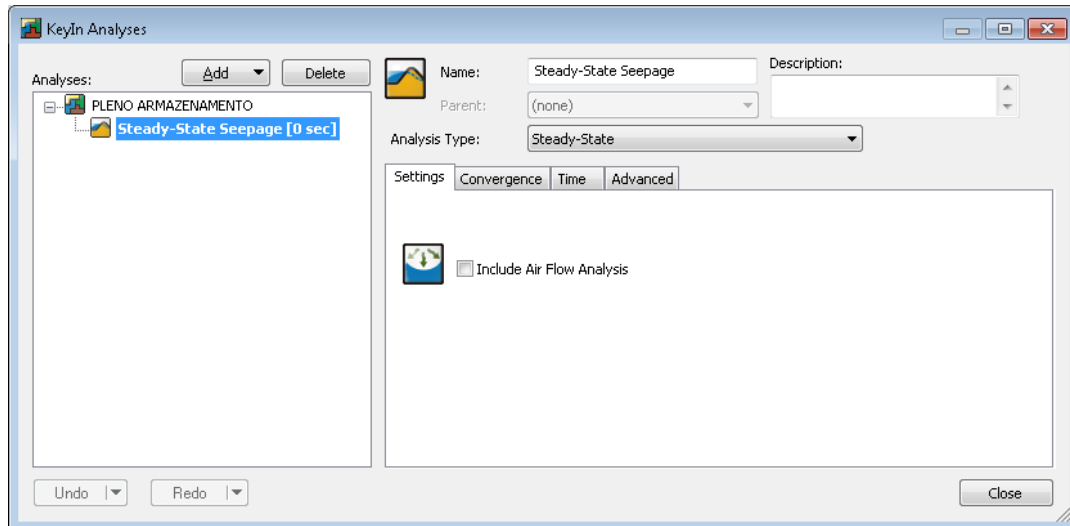


Fig. 5.1 – SEEP/W - Menu Análises.

Foi adicionado um novo ficheiro do tipo *Steady-State Seepage*, e não foi seleccionada a opção de análises de fluxo de ar, dado não ser esta relevante na simulação pretendida. São ilustradas nas Fig.5.2. e 5.3. as opções definidas a nível de convergência e tempo.

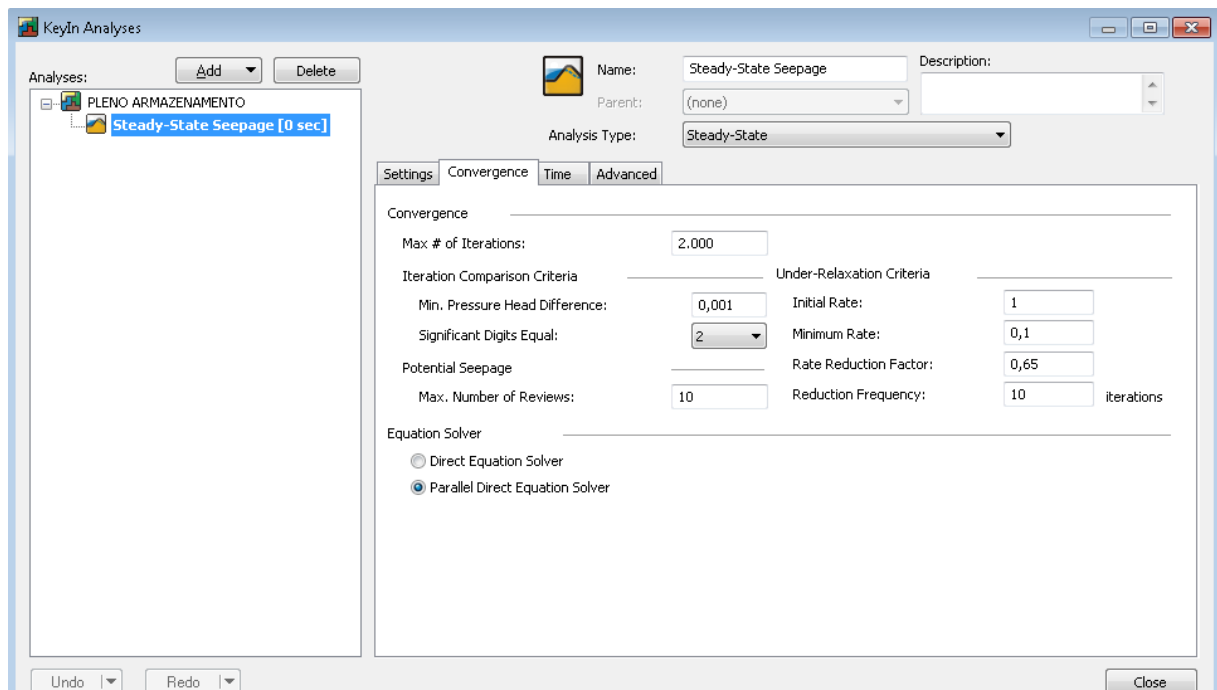


Fig. 5.2 – SEEP/W - Definição de convergência.

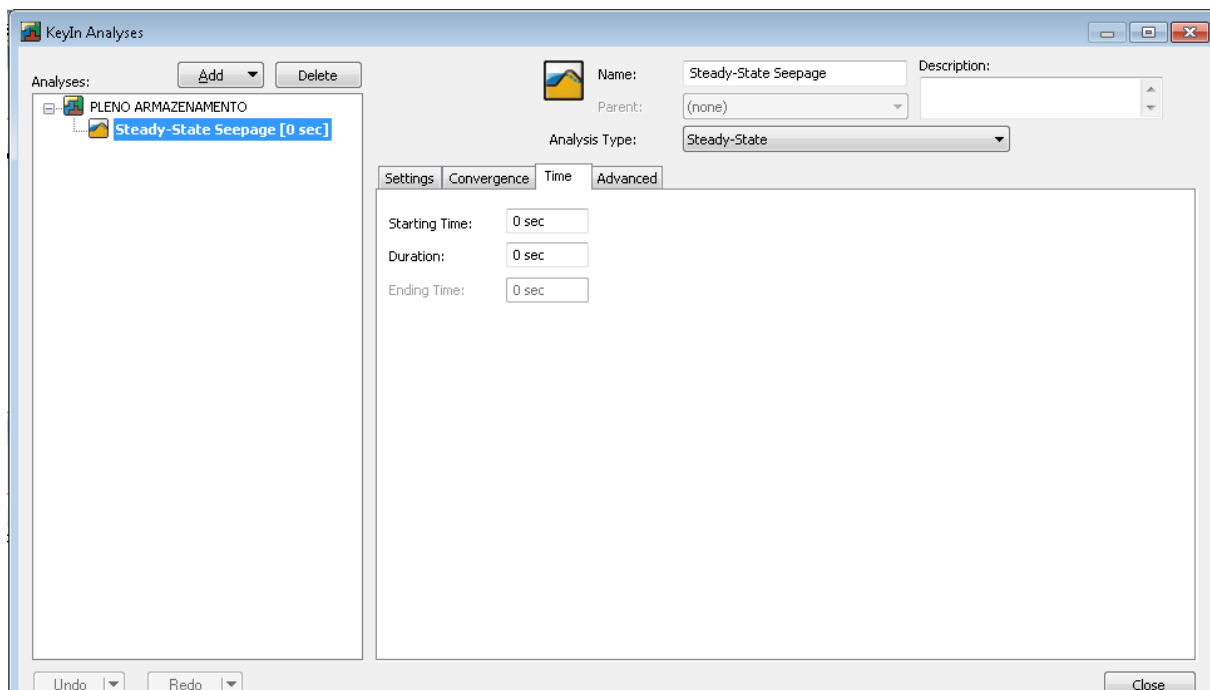


Fig. 5.3 – SEEP/W - Definição do tempo de análise.

Foi escolhido um número máximo de iterações igual a 2000, e um valor de 0,001 para a máxima diferença entre valores nodais da altura piezométrica entre iterações. Em relação ao tempo, a duração da análise é de zero segundos pois apenas interessa para a simulação obter a solução para um regime permanente, correspondente ao pleno armazenamento.

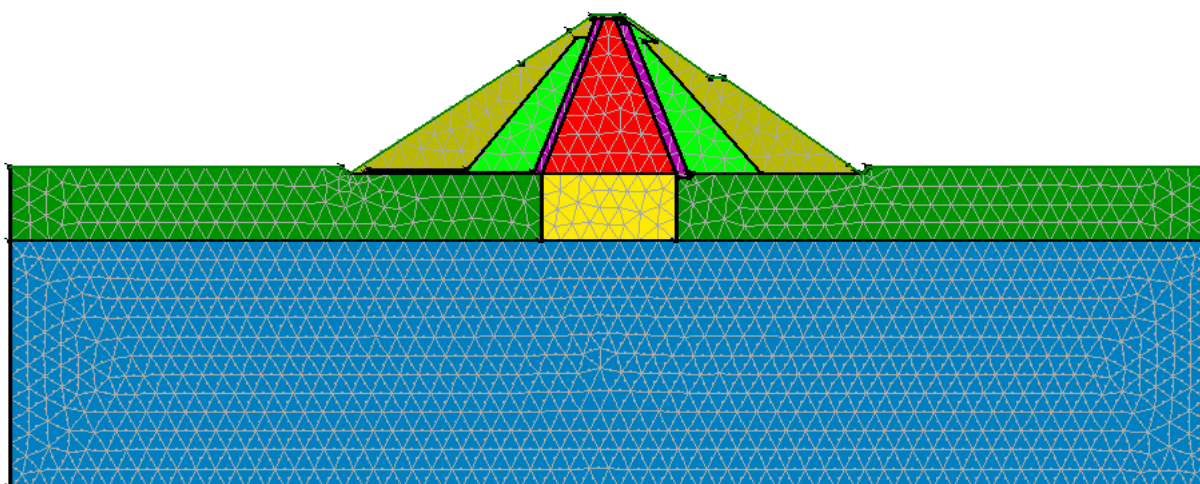


Fig. 5.4 – SEEP/W - Geometria, materiais e malha definidos.

Tendo definido a geometria, os materiais e a malha, o próximo passo será definir as *Boundary Conditions*, caracterizando o nível de água a montante e a jusante. Esta caracterização será exibida nas Figs. 5.5, 5.6 e 5.7.

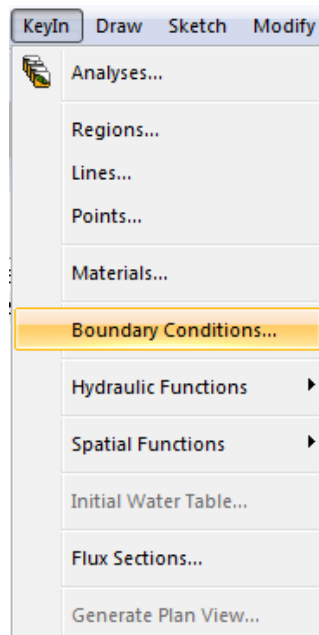


Fig. 5.5 – SEEP/W - Condições de fronteira.

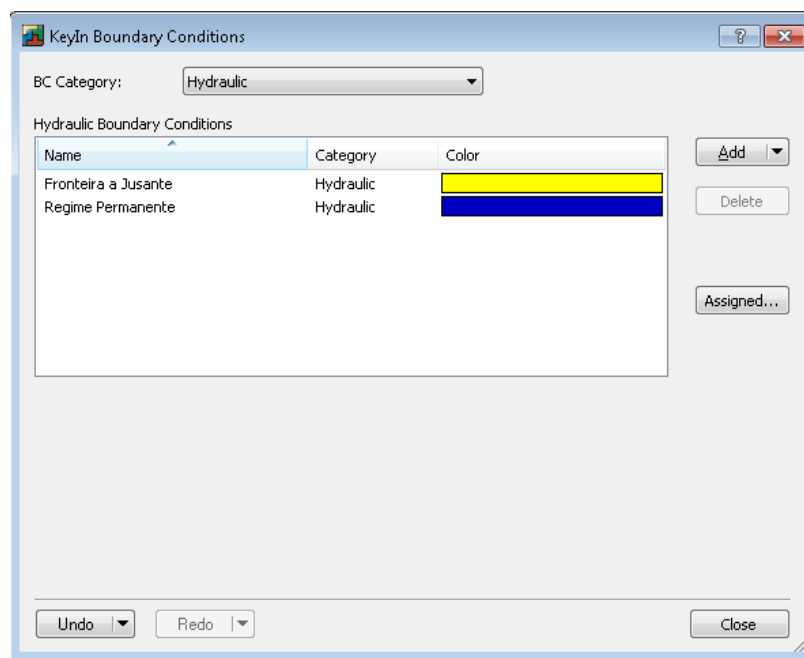


Fig. 5.6 – SEEP/W - Definição das condições de fronteira para montante e jusante.

São adicionadas duas novas condições de fronteira, uma irá definir o nível de água a montante igual a 42,5 m e a outra a jusante com o valor de 12,6 m. Foi escolhida a opção de altura de carga, no entanto podia-se ter optado por definir o nível de água, pela pressão, caudal ou gradiente hidráulico.

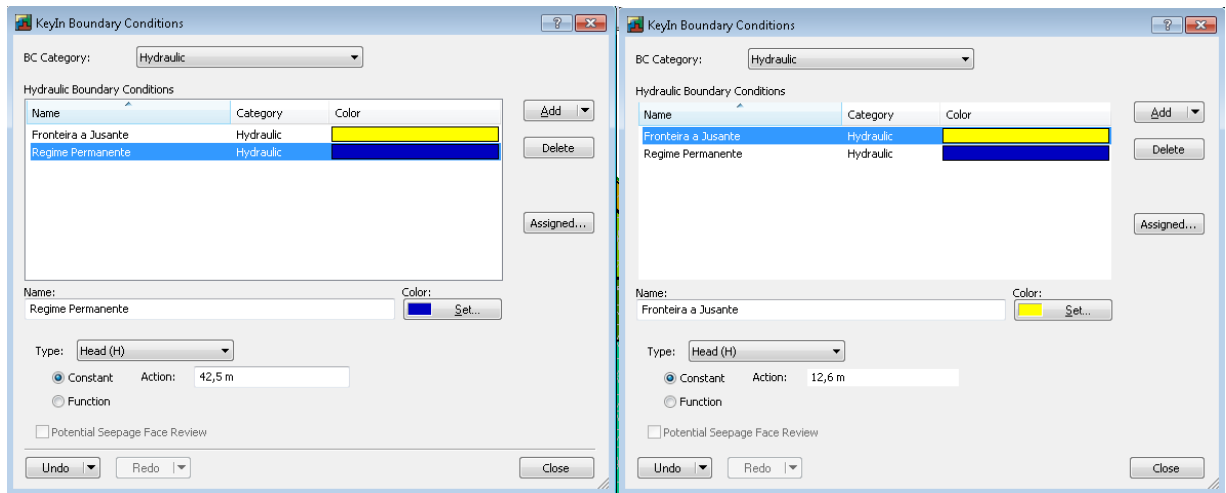


Fig. 5.7 – SEEP/W - Regime permanente a montante e condição de fronteira a jusante.

Estando então definidas estas condições resta apenas desenhá-las. Com recurso ao menu *Draw* é atribuída a cada zona do contorno o valor da respetiva carga total, como ilustra a Fig. 5.8.

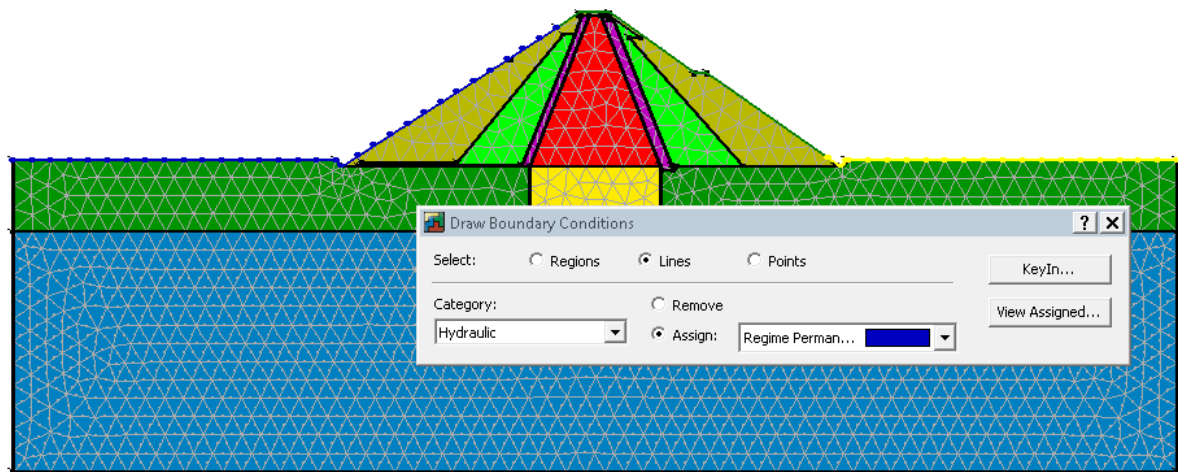


Fig. 5.8 – SEEP/W - Atribuição das condições de fronteira.

Os dados estão agora todos inseridos, e pode-se então proceder a análise do comportamento hidráulico, com uso da opção *Solve Manager*.

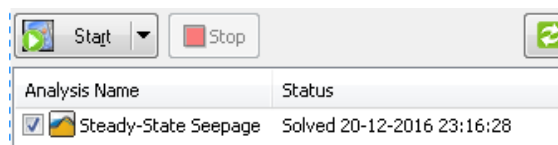


Fig. 5.9 – SEEP/W - Iniciar análise.

Os resultados serão apresentados no fim deste subcapítulo em paralelo com os obtidos no programa RS2, através dos passos a seguir descritos.

#### 5.2.2. RS2

O procedimento irá começar após ter sido já definida a geometria, os materiais constituintes da barragem e a malha, explicação esta apresentada na secção 4.4.2.

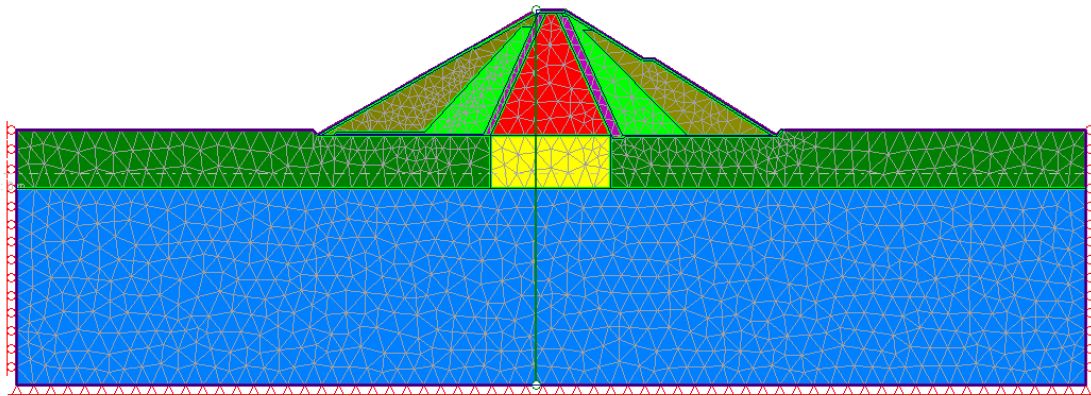


Fig. 5.10 – RS2 - Geometria, materiais e malha definidos.

Será agora escolhido o tipo de análise *Steady-State* em semelhança ao que foi feito no software SEEP/W, assim como as definições de convergência.

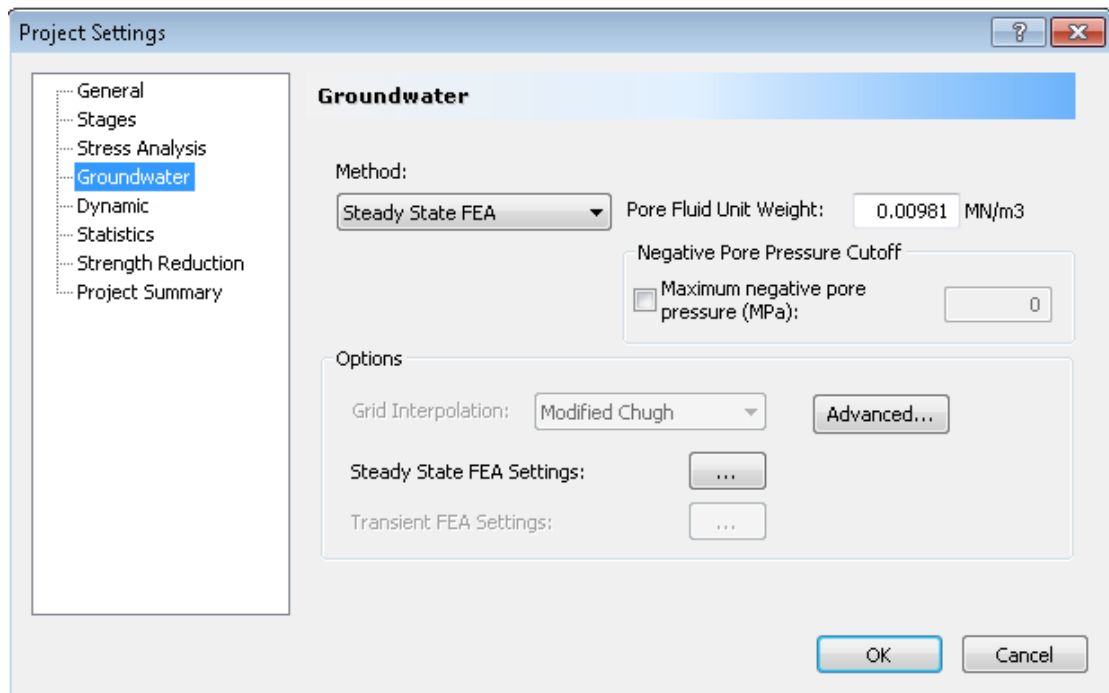


Fig. 5.11 – RS2 - Definições de Projeto, nível freático.

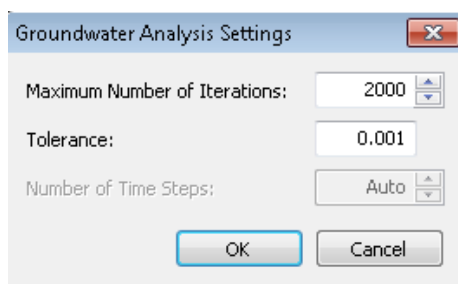


Fig. 5.12 – RS2 - Convergência.

Foi aqui escolhido também, um número máximo de iterações igual a 2000 e uma tolerância igual a 0,001, garantindo assim o mesmo nível de exigência em ambos os programas.

Feito isto, será agora abordada a definição do nível de água a montante e jusante.

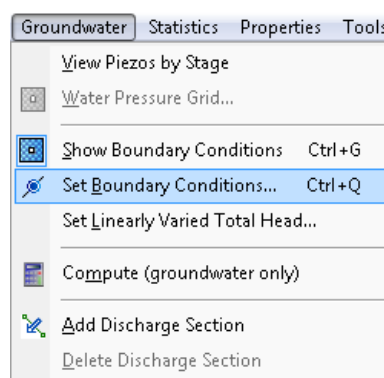


Fig. 5.13 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira.

O RS2 oferece várias opções para a definição das condições hidráulicas. É escolhida a opção de atribuição de carga hidráulica, tal como foi feito no SEEP/W. O programa permite ainda aplicar esta condição em segmentos da geometria, vértices ou mesmo nós. Serão escolhidos os mesmos segmentos que no programa SEEP/W. A carga a montante tem o valor de 42,5 m e a jusante de 12,6 m.

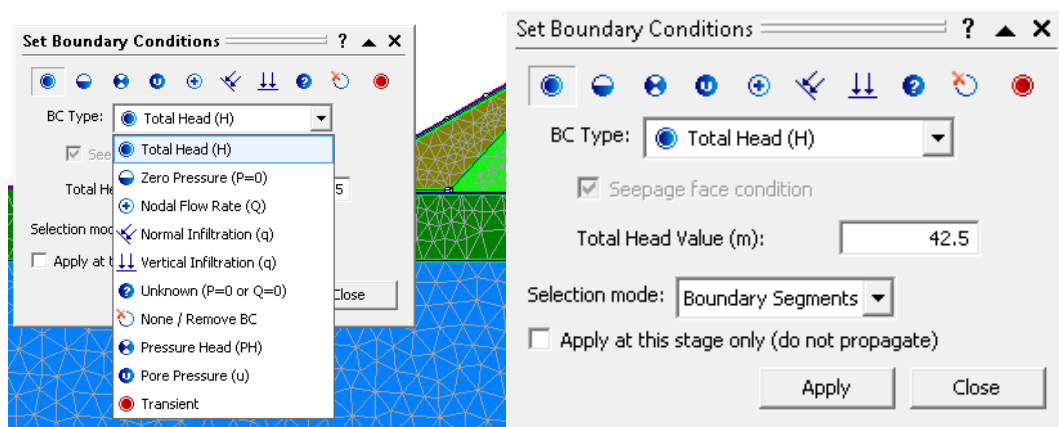


Fig. 5.14 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira, carga hidráulica.





É possível verificar que o resultado obtido em ambos os programas é bastante semelhante, tendo sido definidos os mesmos limites e cores de *Contours* para facilitar a interpretação e comparação de ambos.

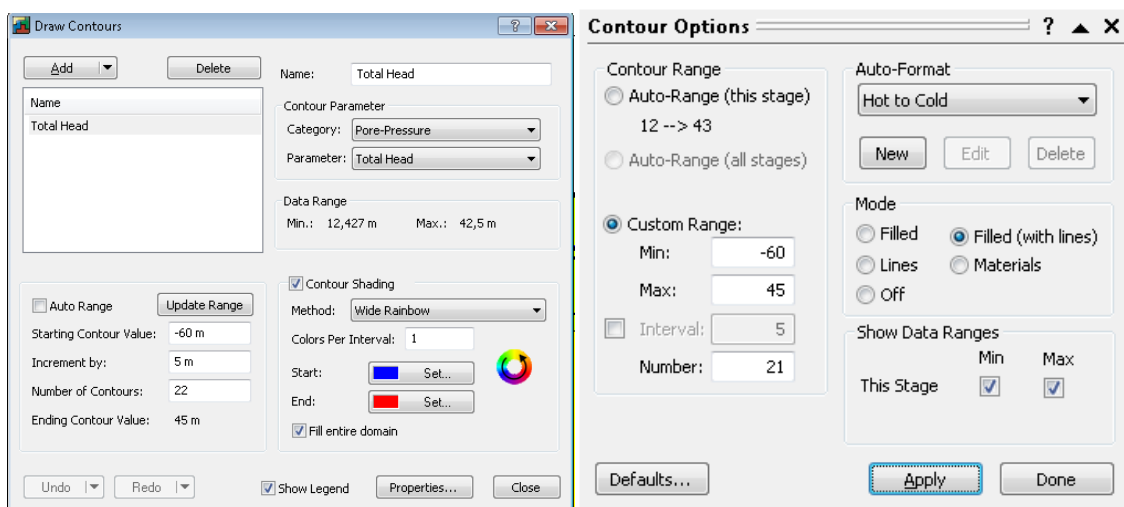


Fig. 5.17 – SEEP/W e RS2 - Definir isocurvas.

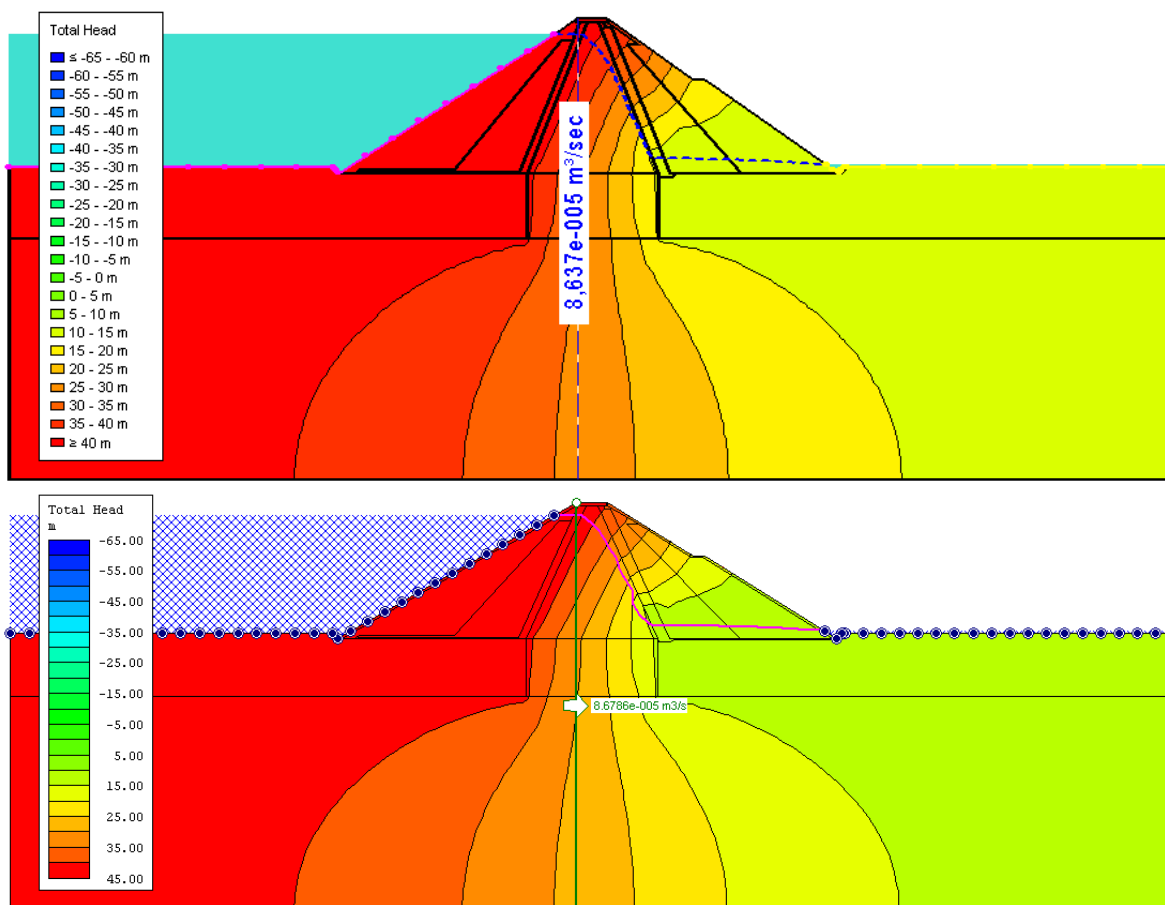


Fig. 5.18 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica.

É possível observar que a evolução da linha de saturação é semelhante nos dois programas, assim como a variação da carga hidráulica. Os valores de caudal percolado são bastante semelhantes também, tomando no SEEP/W o valor de  $8,6370 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  e no RS2 de  $8,6786 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

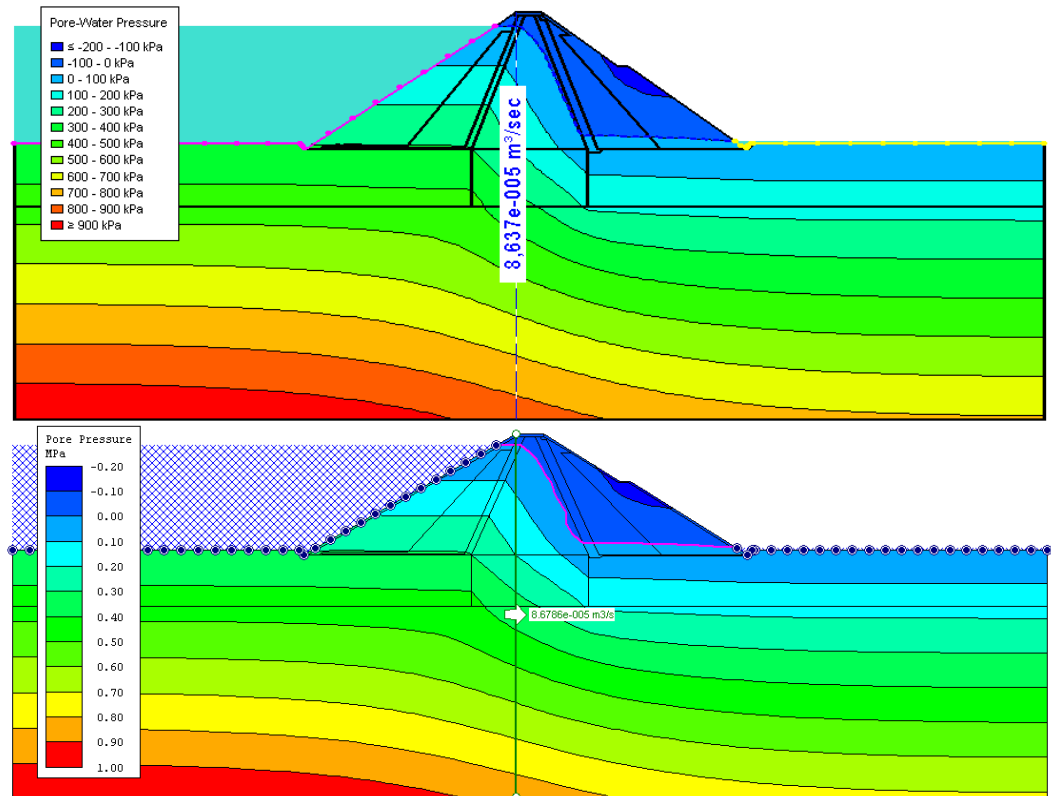


Fig. 5.19 – SEEP/W e RS2 - Pressão neutra.

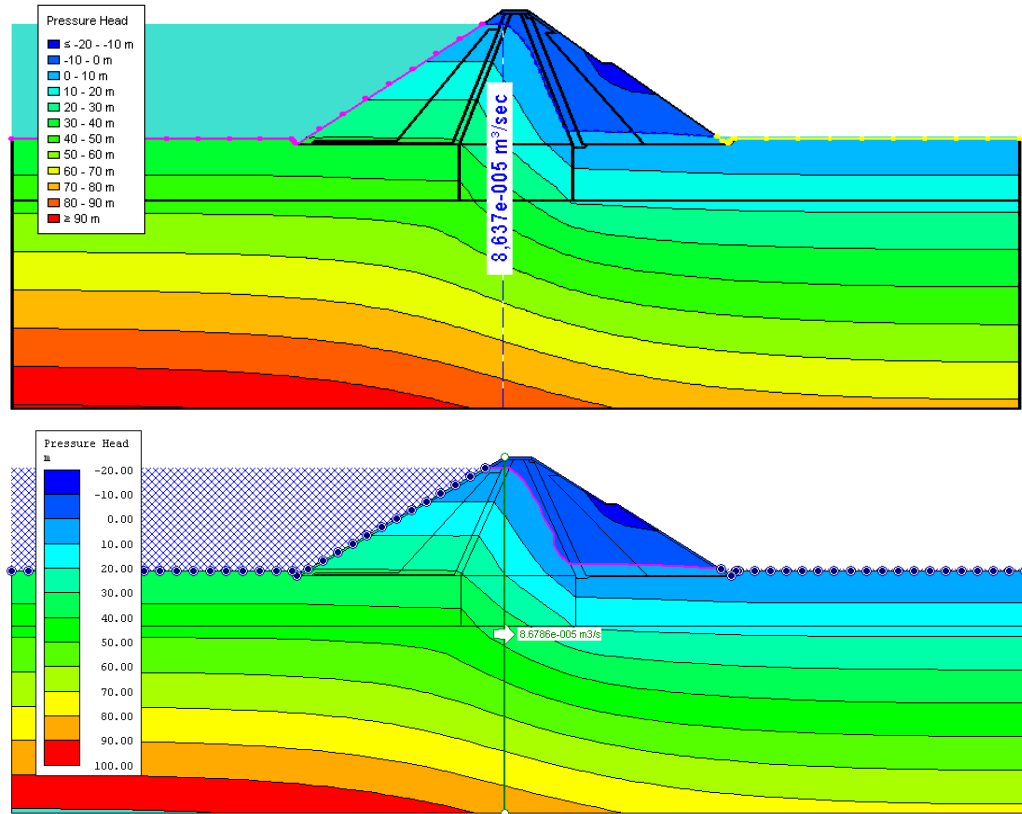


Fig. 5.20 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica.

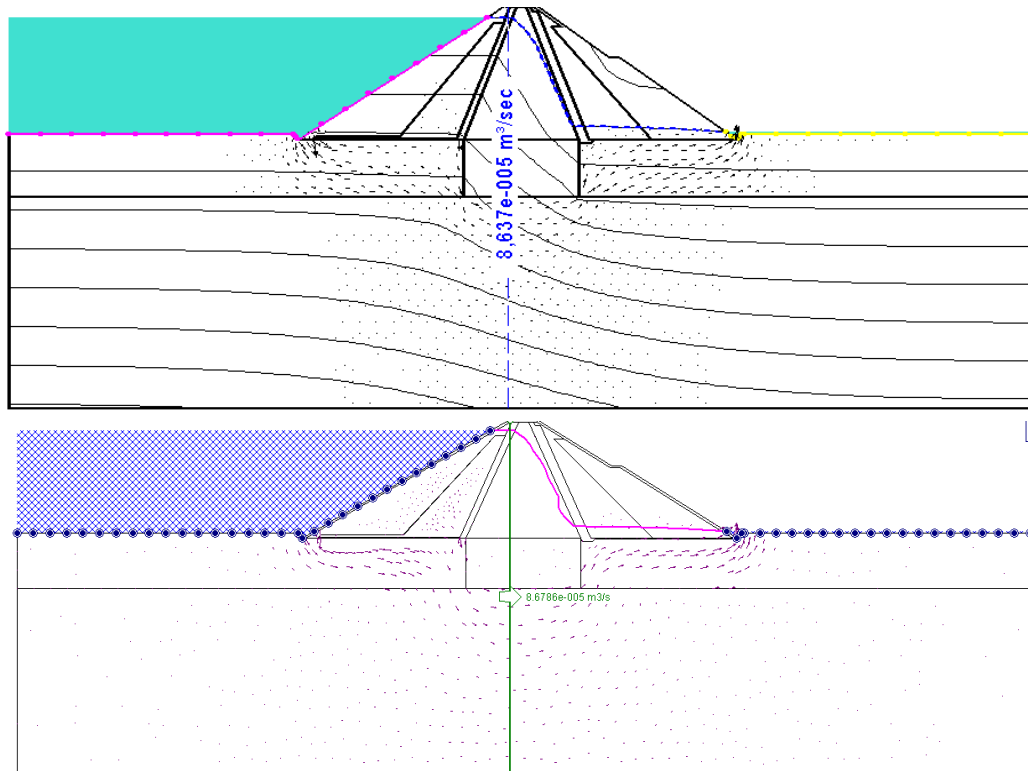


Fig. 5.21 – SEEP/W e RS2 - Vetores de fluxo.

### 5.3. Esvaziamento Rápido

Foi feito o estudo do efeito do esvaziamento da albufeira em 60 horas durante um período de 120 dias. Este estudo é feito tendo em conta a situação descrita no subcapítulo anterior, referente à realidade da barragem de S. Domingos. A análise começa com a situação de regime permanente, em que a barragem está cheia a montante, com o nível de água de 42,5 m, processando-se o esvaziamento ao longo de 60 horas até atingir o nível de 17,55 m a montante. A análise é feita partindo do princípio que o nível médio da água a jusante permanece imutável com o valor de 12,6 m.

São definidas as curvas de vazão em ambos os programas, curvas estas que regem o esvaziamento da barragem ao longo do tempo.

Será descrito todo o processo de modelação para ambos os programas, e comparados novamente os resultados em paralelo.

Esta simulação, sendo uma análise ao longo do tempo, tem características diferentes da anterior e, como tal, algumas definições terão que ser alteradas.

#### 5.3.1. SEEP/W

O SEEP/W funciona num esquema semelhante a uma árvore com ramificações, isto é, as análises partem de um ficheiro base, normalmente do tipo *Steady-State*.

O primeiro passo é criar um novo ficheiro de análise do tipo *Transient*. Esta análise por definição, significa que algo está em constante mudança, pois agora considera-se o tempo que o solo demora a responder às condições impostas pelo utilizador.

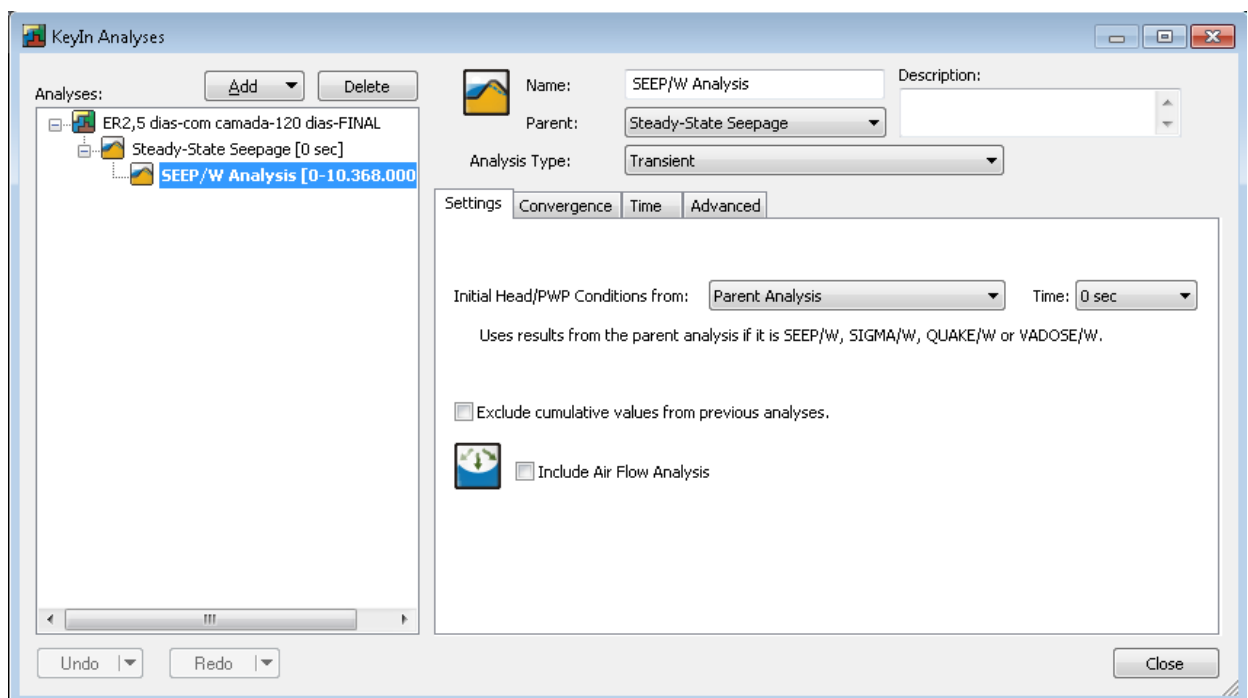


Fig. 5.22 – SEEP/W - Definições de análise transitória.

Foi escolhido como condição inicial o ficheiro da análise de regime permanente, *Parent Analysis*, podendo ter sido um outro ficheiro do GeoStudio ou mesmo uma função espacial.

Em termos de convergência, as definições permaneceram as mesmas.

No submenu *Time*, criaram-se vários momentos específicos do tempo ao longo dos 120 dias. Note-se que o tempo é medido em segundos, sendo importante que coincida nos dois programas em análise.

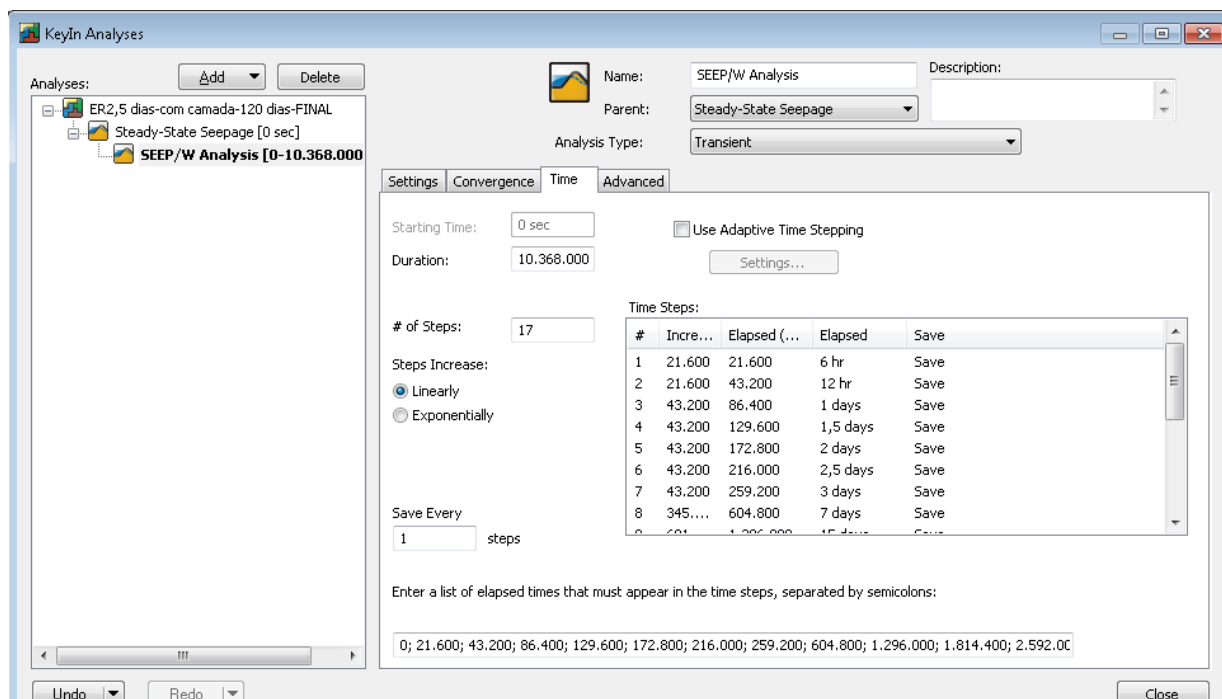


Fig. 5.23 – SEEP/W - Definição do tempo de análise.

Serão feitas análises para os instantes descritos na coluna *Elapsed*, para o instante inicial (0 segundos), para 6 horas, 12 horas, 24 horas, etc. Esta sequência temporal pode ser consultada no Quadro 5.1.

O passo seguinte é a criação de novas *Boundary Conditions* a montante, conforme ilustra a Fig. 5.24.

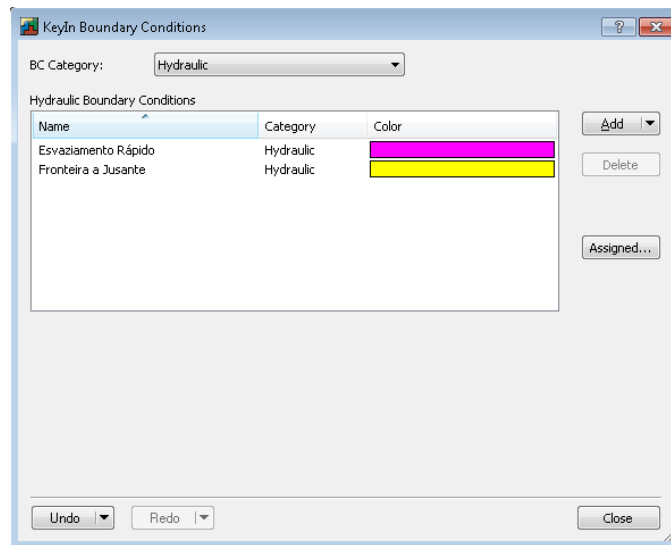


Fig. 5.24 – SEEP/W.- Criação de condições de fronteira.

São definidas as características da curva de esvaziamento, considerando um esvaziamento linear entre as 0 e as 60 horas, e que depois o nível de água a montante se mantém o mesmo. Já a jusante o nível permanece igual a 12,6 m ao longo de toda a análise.

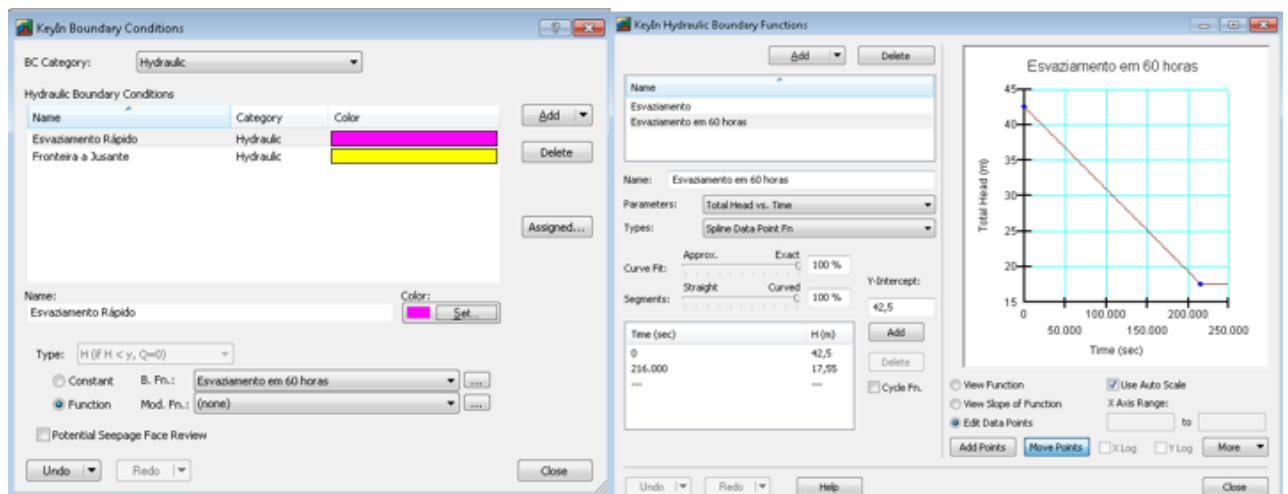


Fig. 5.25 – SEEP/W - Função de esvaziamento de montante.

Depois resta apenas atribuir aos segmentos corretos cada uma destas condições, pelo menu *Draw Boundary Conditions*. O resultado é o que se segue. O programa está pronto para proceder à análise de esvaziamento rápido.

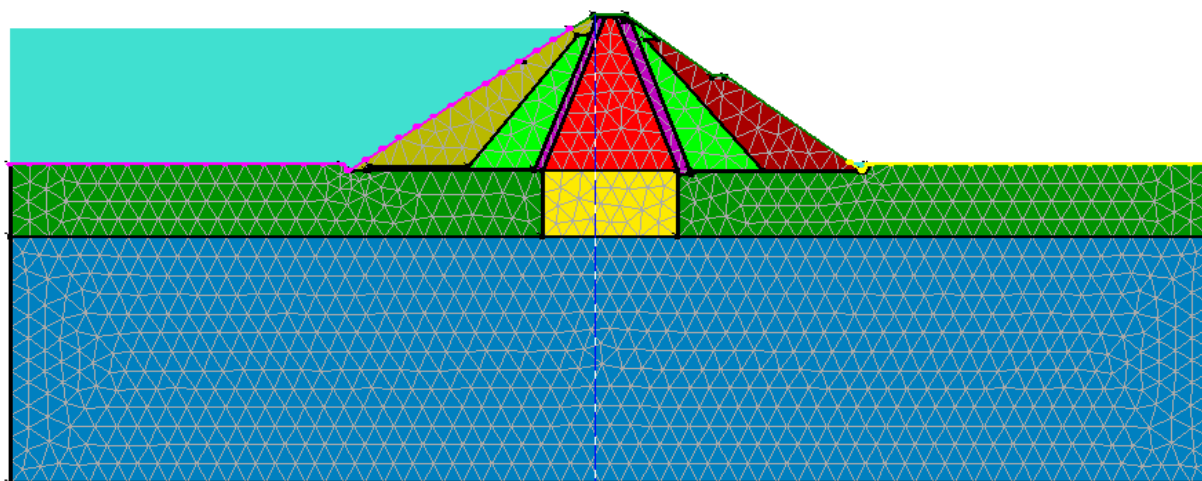


Fig. 5.26 – SEEP/W - Condições fronteira de montante e jusante.

### 5.3.2. RS2

Da mesma forma foi criado um novo ficheiro RS2 para proceder a esta análise tendo por base o ficheiro anterior. A geometria, materiais e malha permanecem os mesmos.

No menu *Project Settings*, são adicionados *Stages* referentes aos tempos em análise, que serão os mesmos usados no programa SEEP/W.

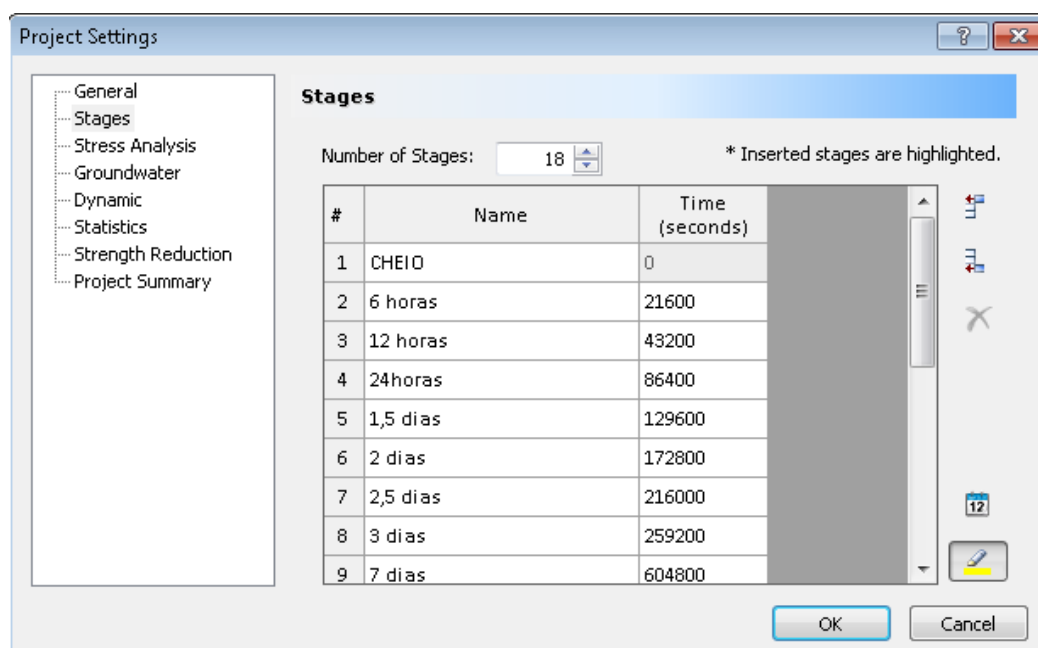


Fig. 5.27 – RS2 - Definição do tempo de análise.

No submenu *Groundwater*, é escolhida a análise *Transient*, tendo como estado inicial a simulação anterior, *Steady-State*. As opções de convergência mantem-se as mesmas: o máximo de 2000 iterações e uma tolerância de 0,001.

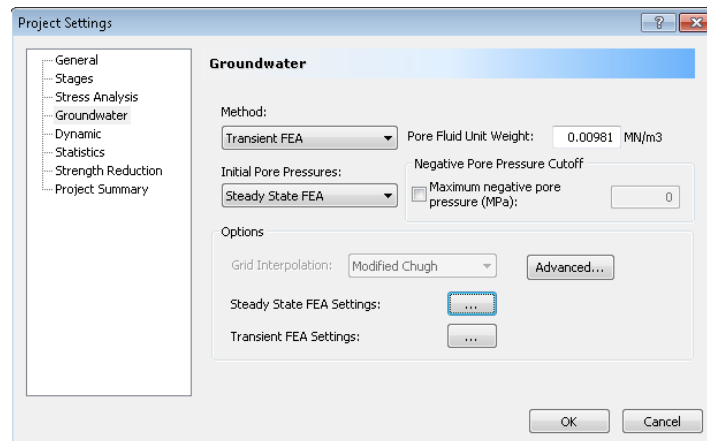


Fig. 5.28 – RS2 - Definições de análise transitória.

Para cada *Stage*, será criada uma nova *Boundary Condition* a montante, começando aos 0 segundos com a carga hidráulica igual a 42,5 m, descendo até aos 17,55 m às 60 horas (2,5 dias), após este instante todos os *Stages* tomam o mesmo valor de 17,55 m. A jusante este valor é de 12,6 m em todos os *Stages*. Este processo é bastante mais moroso que o feito no SEEP/W, pois exige que se insira manualmente os valores da carga em cada instante.

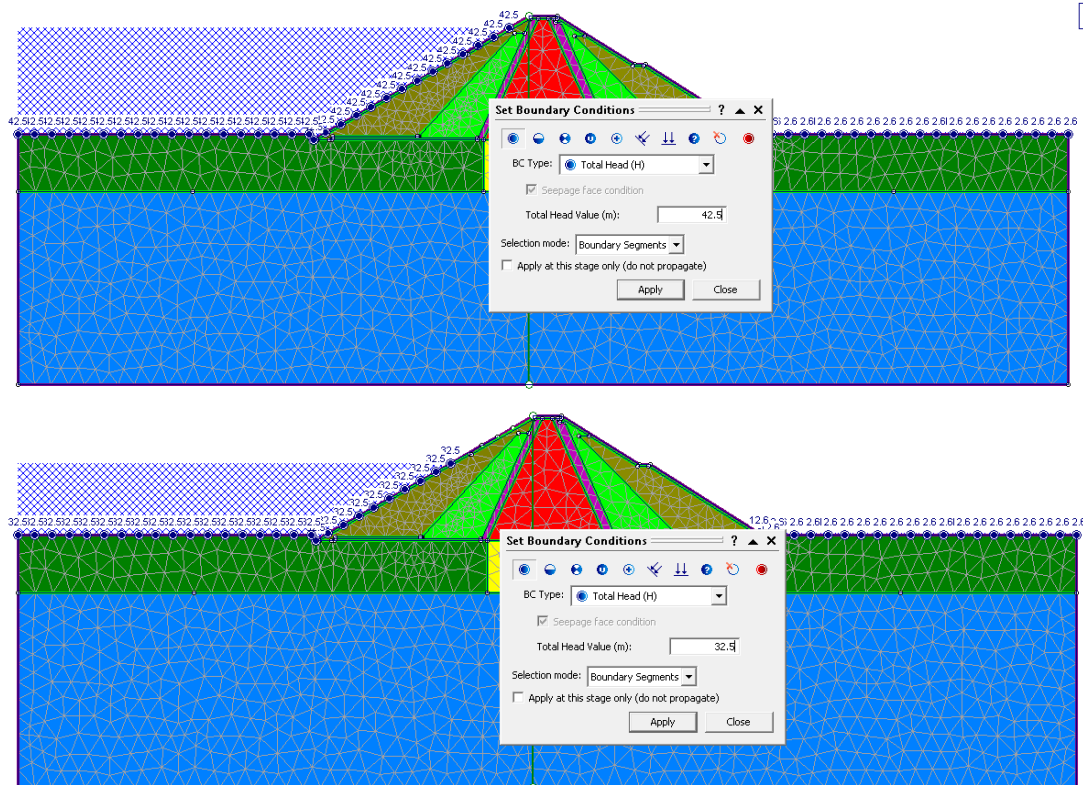


Fig. 5.29 – RS2 - Atribuição das condições de fronteira, exemplo para 0 e 24 horas.



Estando o valor da carga hidráulica caracterizado, quer a montante, quer a jusante, para todos os instantes em análise (*Stages*), pode ser ativado o cálculo no menu *Compute*.

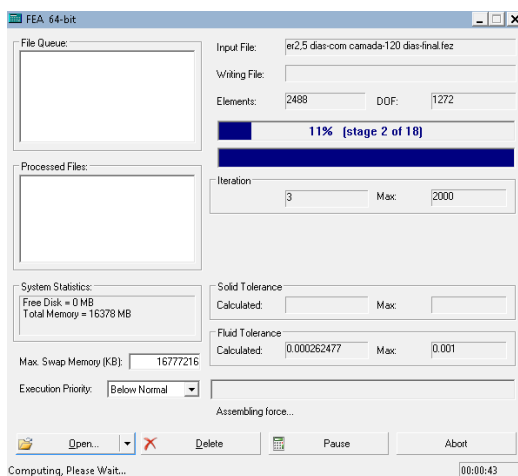


Fig. 5.30 – RS2 - Computação.

Ambos os programas estão agora prontos para que os resultados possam ser interpretados.

### 5.3.3. RESULTADOS

Esta interpretação será como anteriormente feita em paralelo, sendo apenas apresentados neste capítulo os resultados para os instantes, 0, 1, 3, 30 e 120 dias. Os restantes resultados poderão ser consultados no Anexo II.

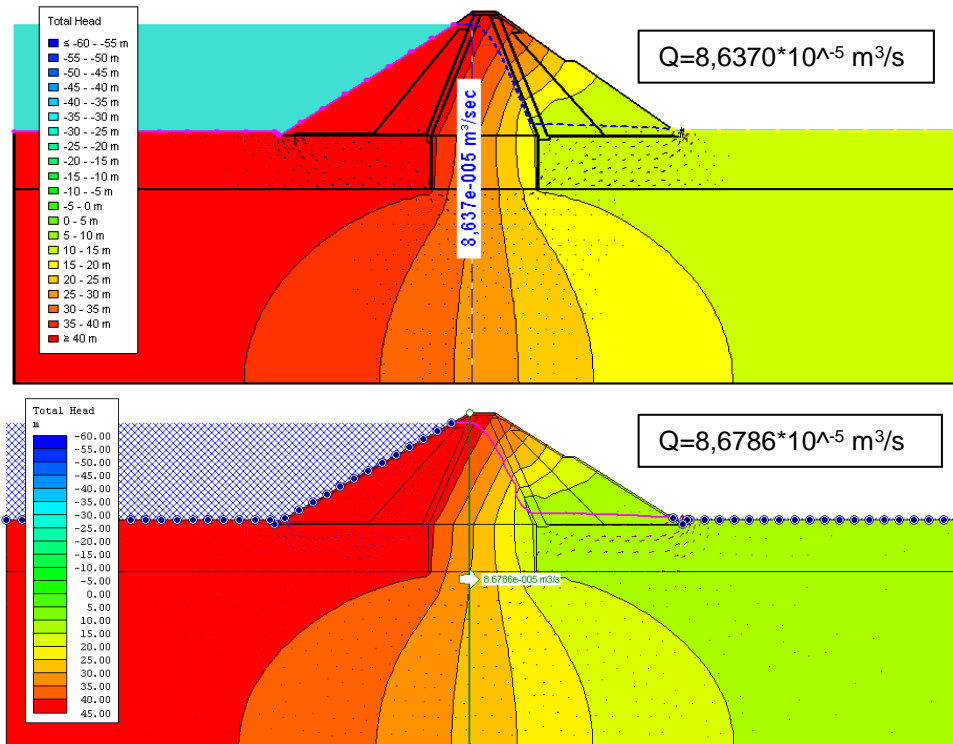


Fig. 5.31 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para instante inicial.

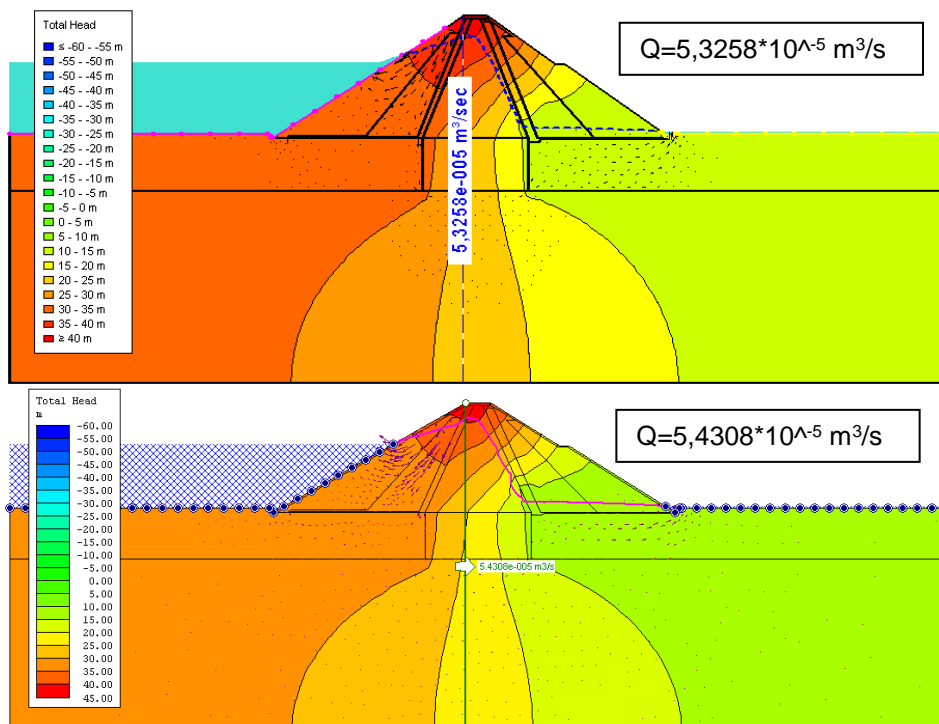


Fig. 5.32 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 1 dia.

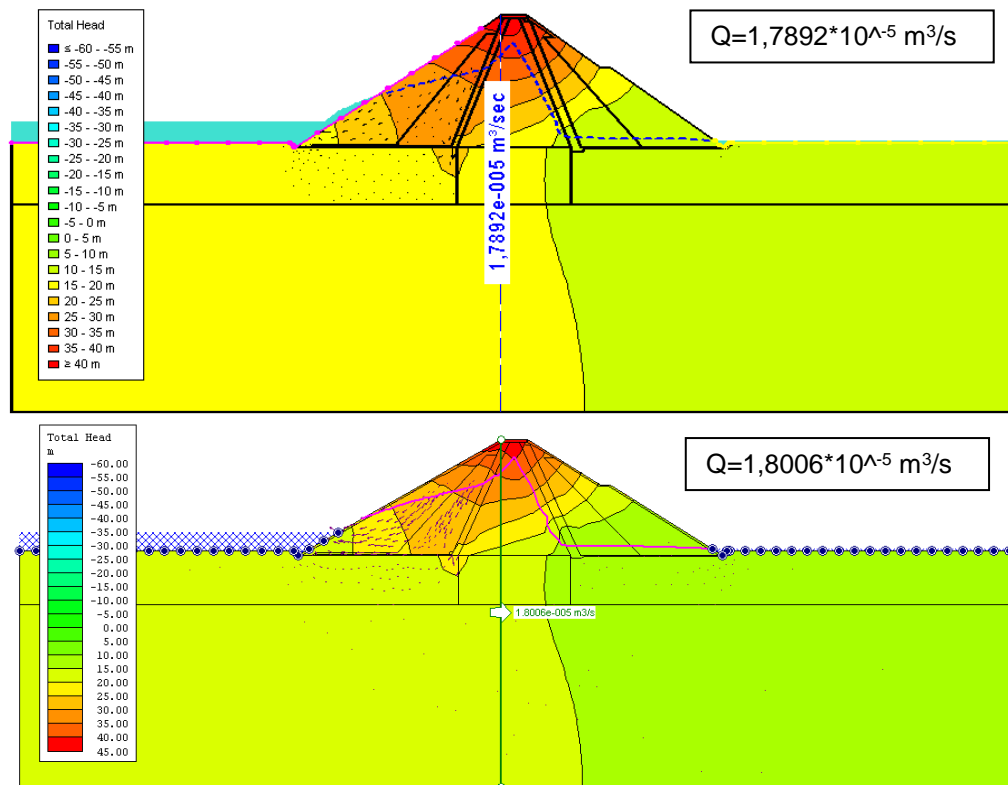


Fig. 5.33 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 3 dias.

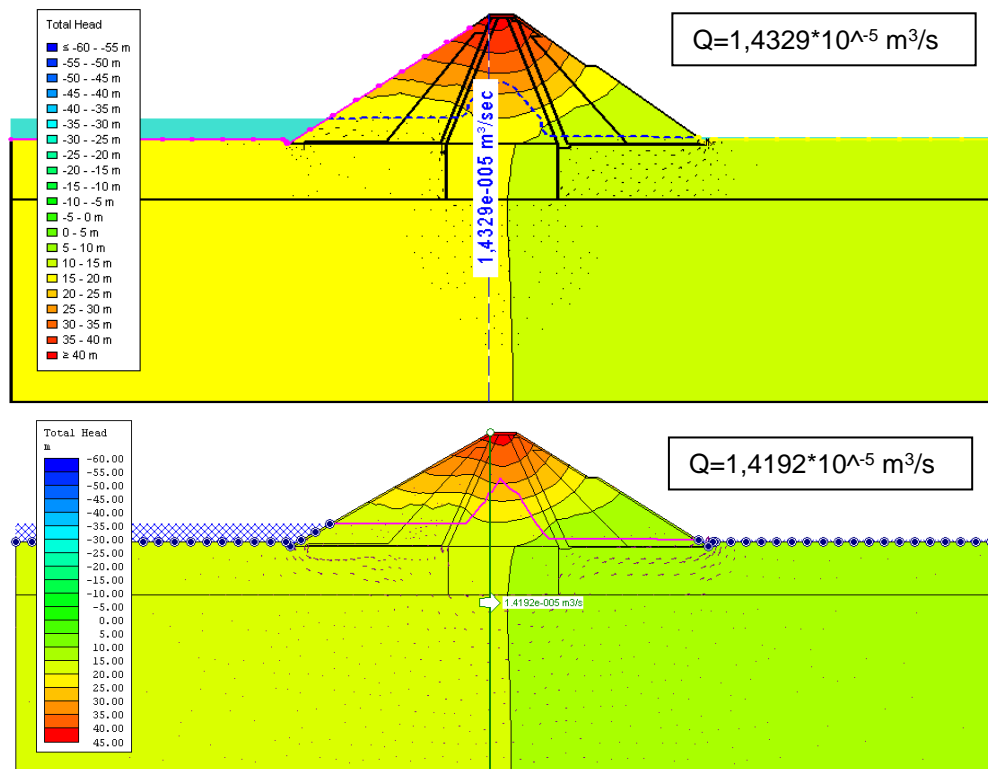


Fig. 5.34 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 30 dias.

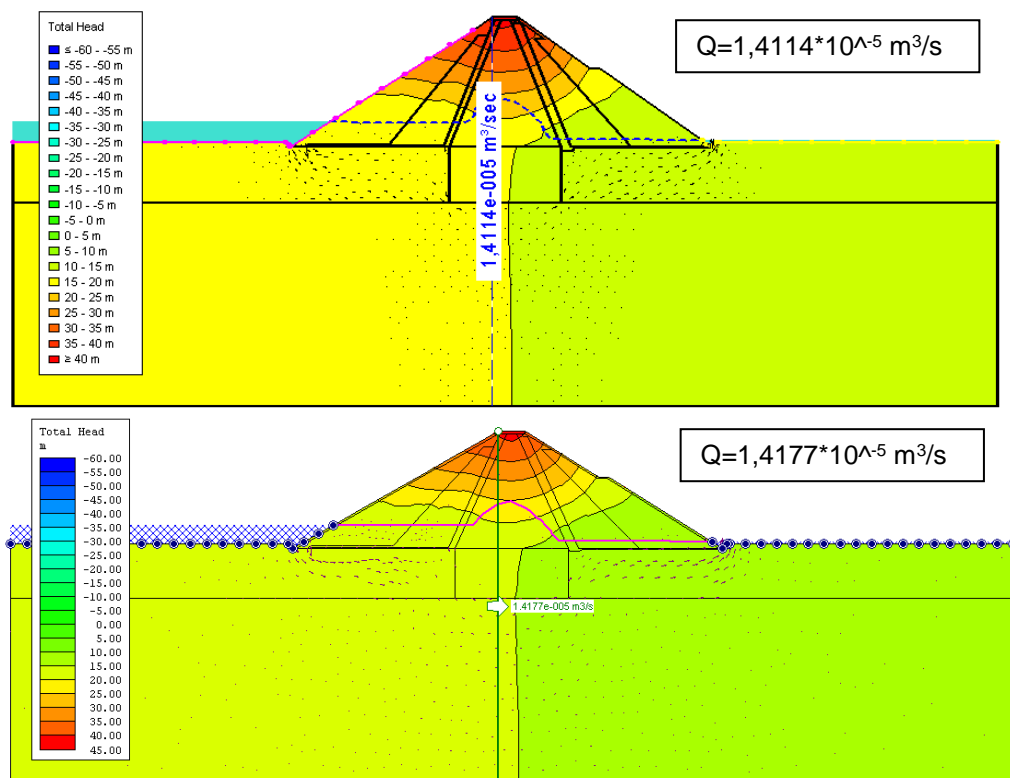


Fig. 5.35 – SEEP/W e RS2 - Carga hidráulica para 120 dias.

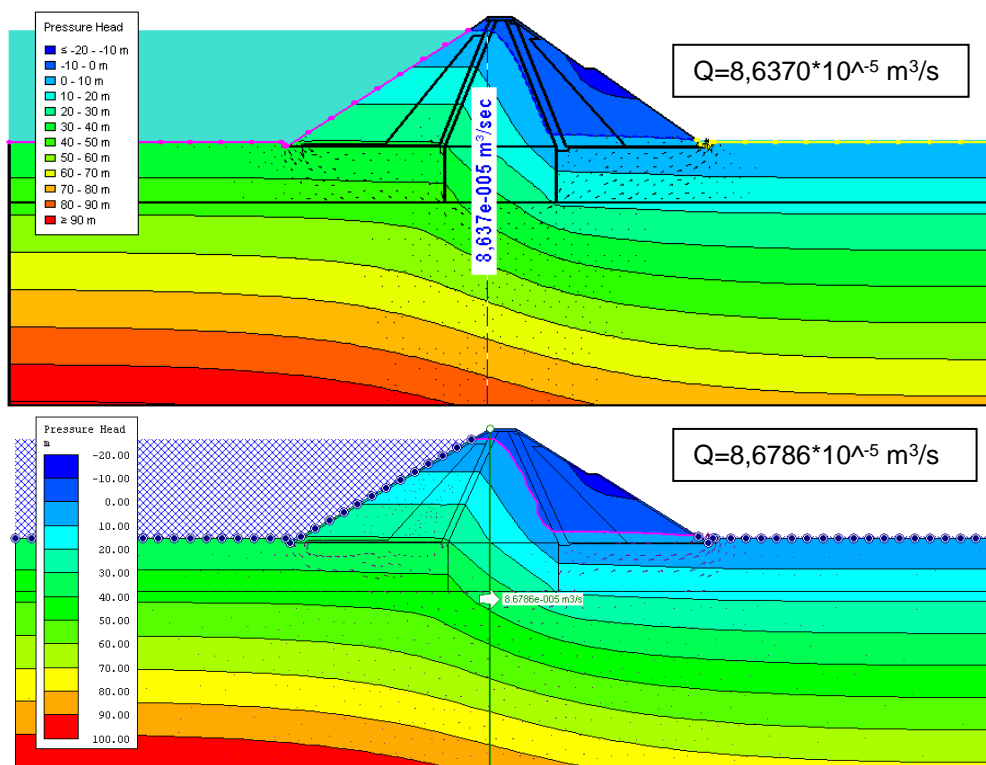


Fig. 5.36 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para o instante inicial.

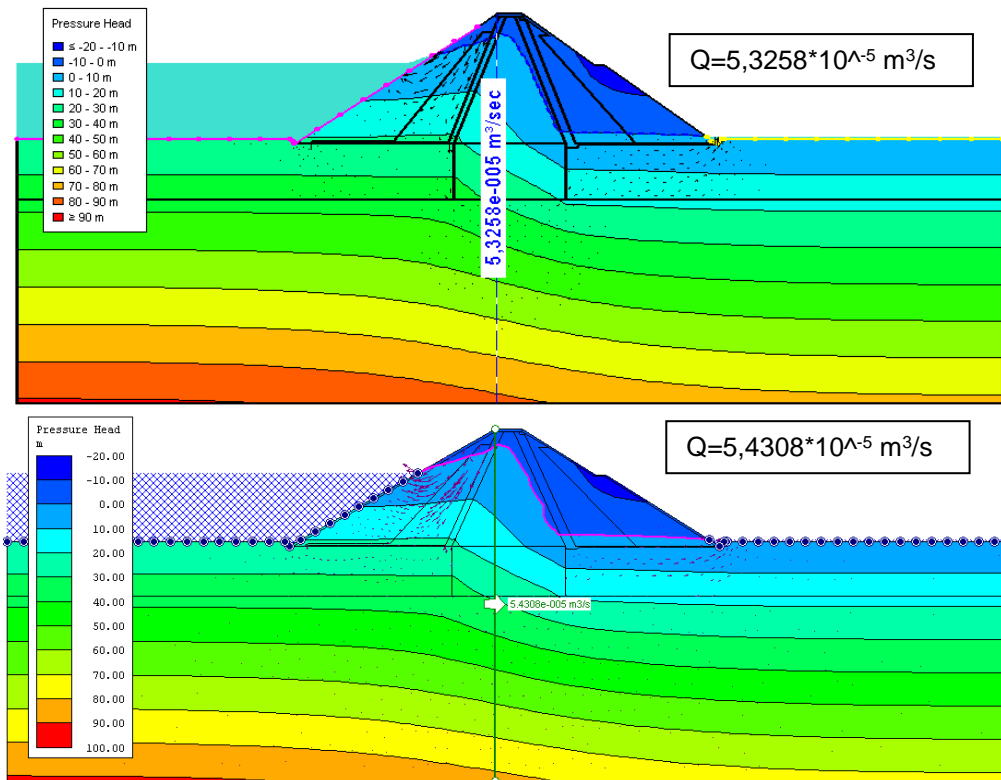


Fig. 5.37 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 1 dia.

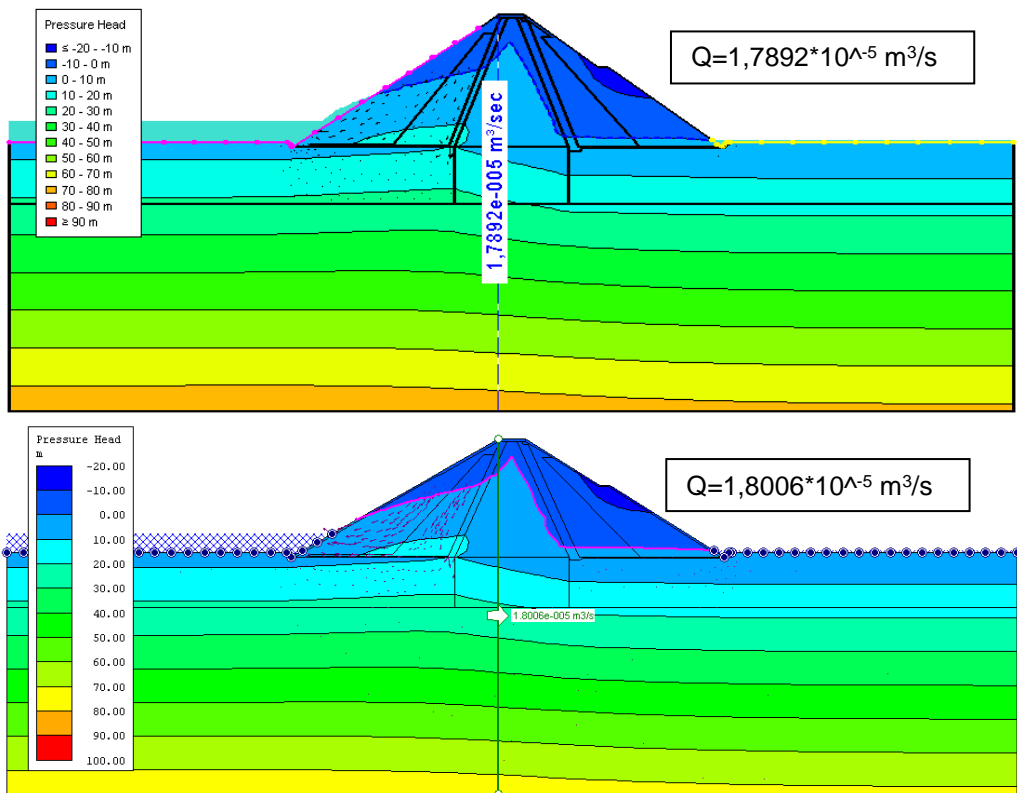


Fig. 5.38 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 3 dias.

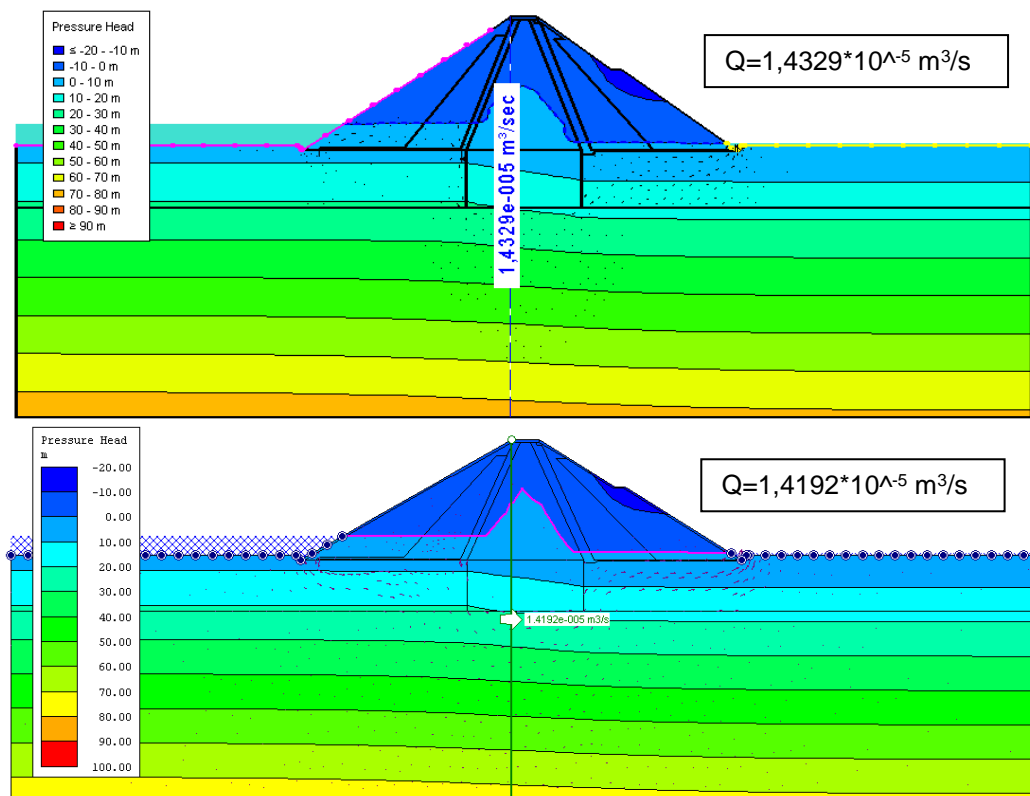


Fig. 5.39 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 30 dias.

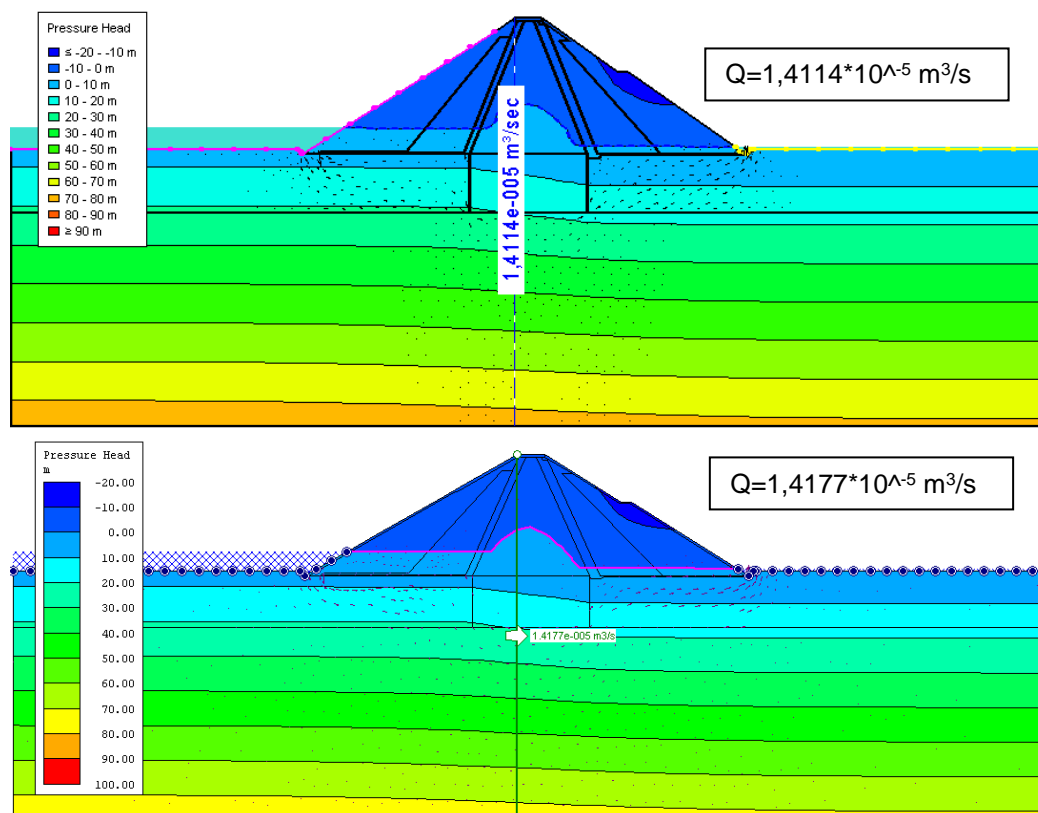


Fig. 5.40 – SEEP/W e RS2 - Altura piezométrica para 120 dias.

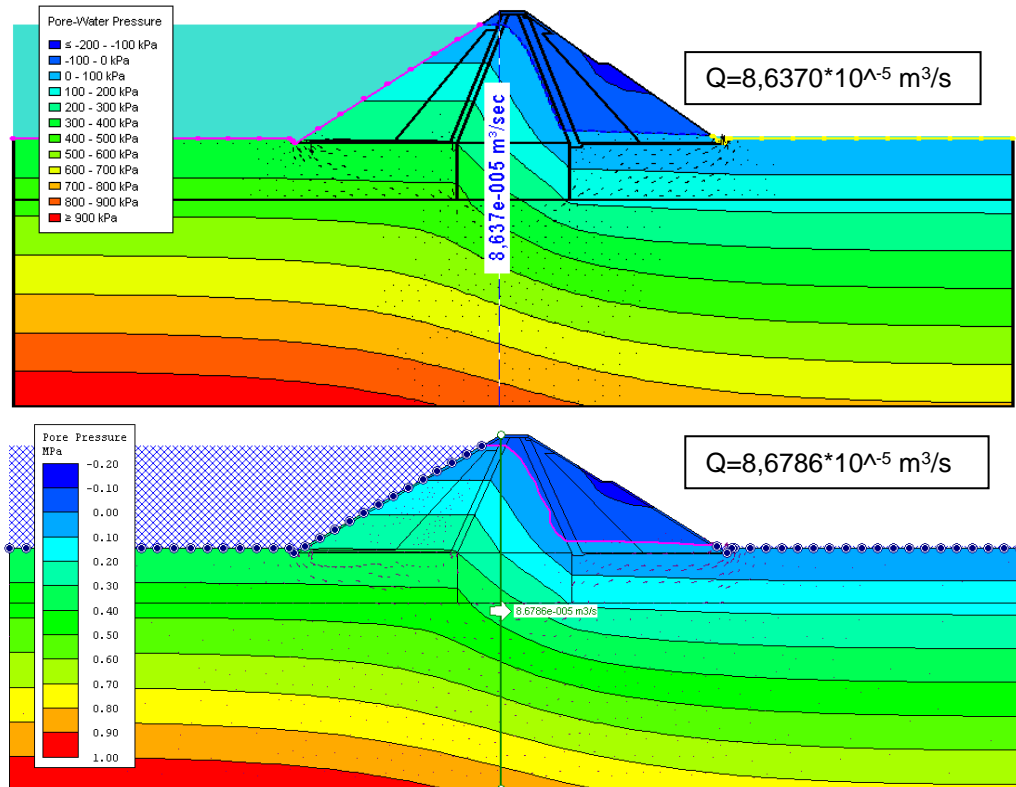


Fig. 5.41 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para o instante inicial.

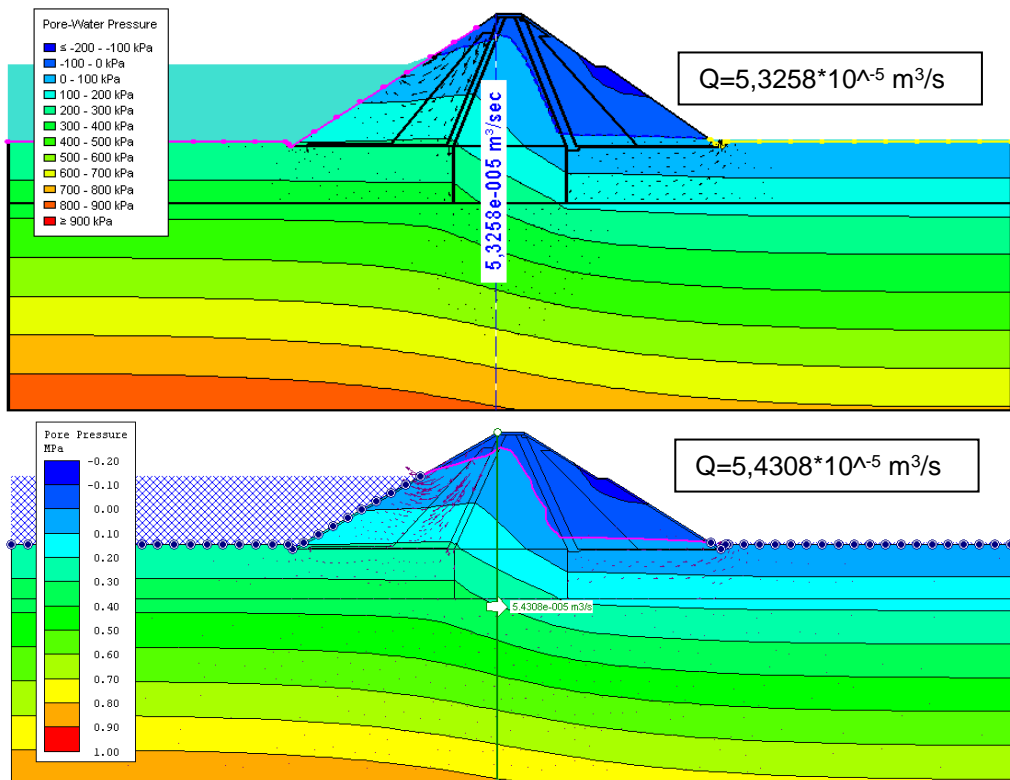


Fig. 5.42 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 1 dia.

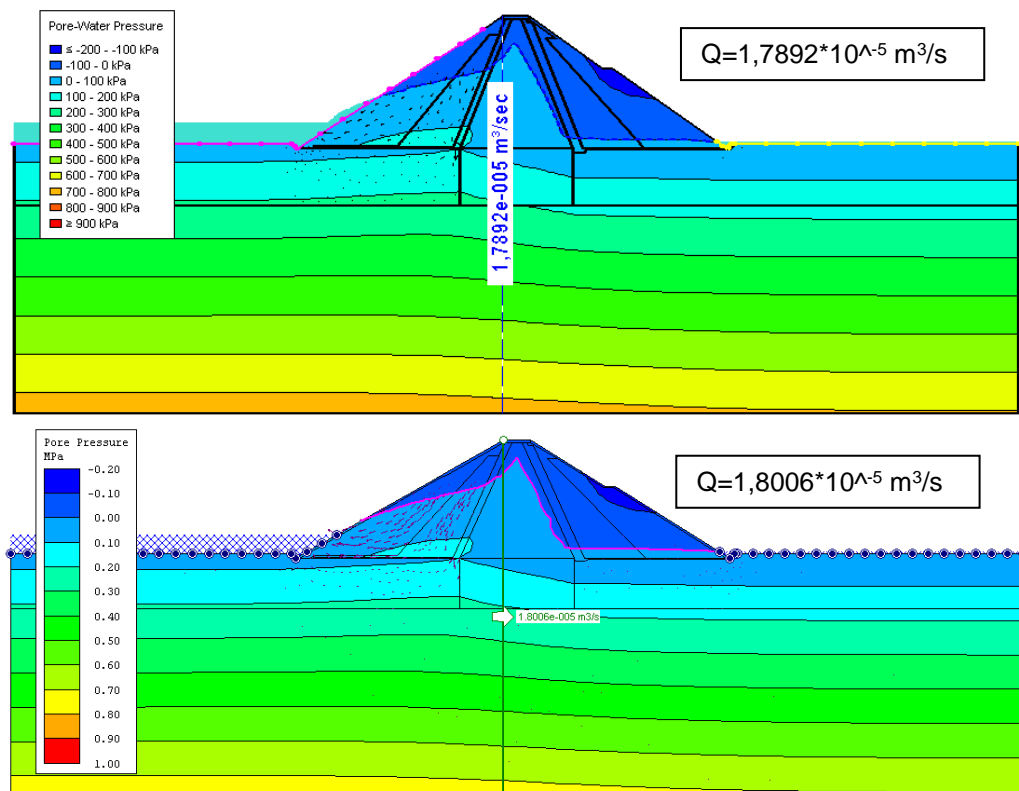


Fig. 5.43 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 3 dias.

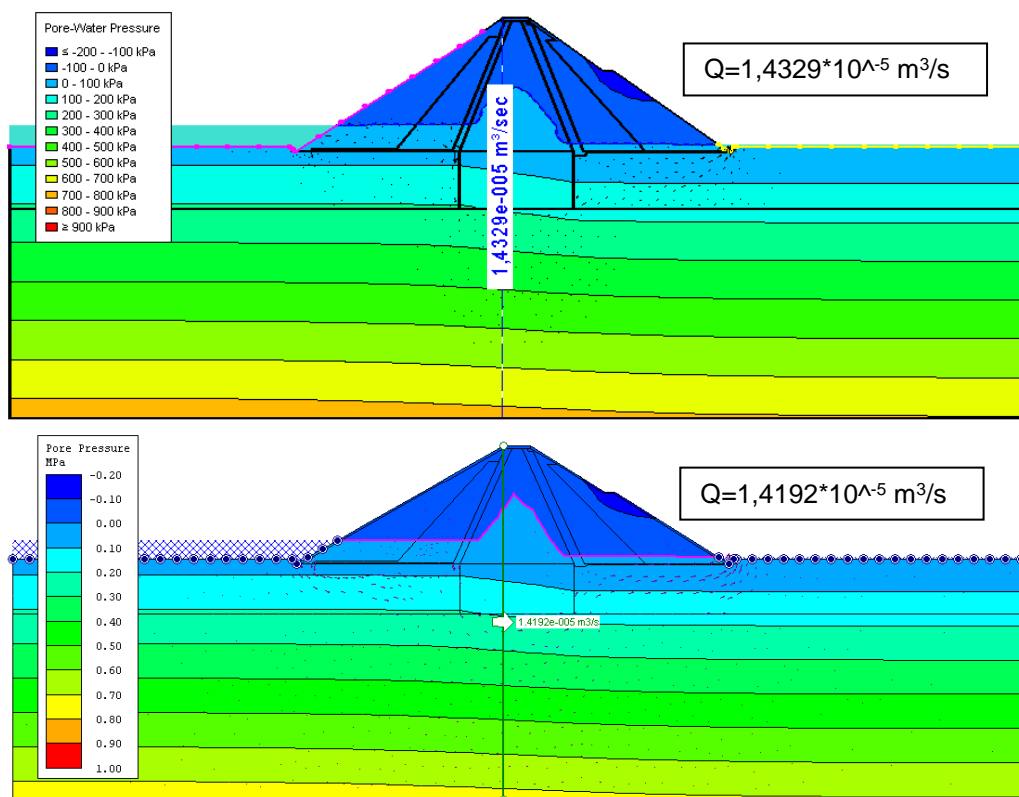


Fig. 5.44 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 30 dias.



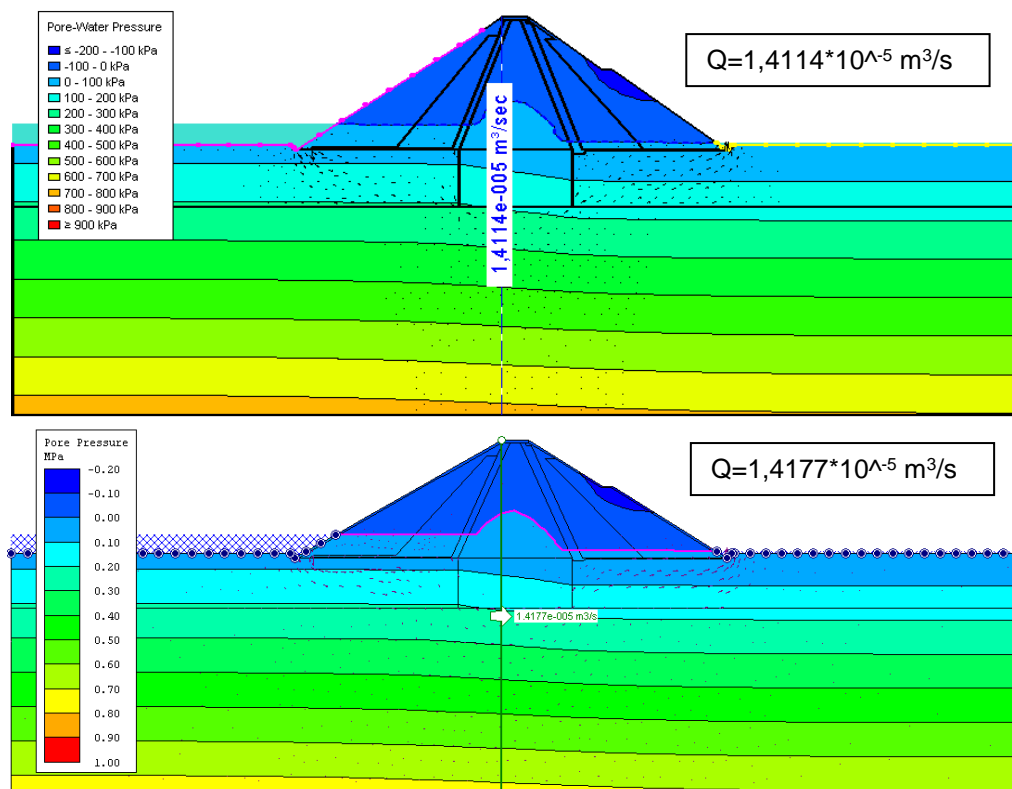


Fig. 5.45 – SEEP/W e RS2 - Pressões neutras para 120 dias.

No Quadro 5.1 é comparado o caudal percolado obtido por cada programa ao longo da análise de esvaziamento rápido.

Quadro 5.1. – Caudal Percolado no Esvaziamento Rápido.

Tempo	SEEP/W(Q(m <sup>3</sup> /s)- *10 <sup>-5</sup> )	RS2(Q(m <sup>3</sup> /s)- *10 <sup>-5</sup> )
0 horas	8,6370	8,6786
6 horas	7,8083	7,9932
12 horas	6,8137	7,1434
24 horas	5,3258	5,4308
36 horas	4,1361	4,0287
48 horas	2,9610	2,9376
60 horas	1,7768	1,6979
3 dias	1,7892	1,8006
7 dias	1,6643	1,6796
15 dias	1,5185	1,4919

21 dias	1,4666	1,4427
30 dias	1,4329	1,4192
45 dias	1,4155	1,4154
60 dias	1,4119	1,4158
75 dias	1,4113	1,4164
90 dias	1,4113	1,4169
105 dias	1,4113	1,4173
120 dias	1,4114	1,4177

Como se pode confirmar, os resultados obtidos por ambos os programas foram bastante próximos, quer a nível de caudal percolado de montante para jusante, quer a nível de evolução temporal do comportamento hidráulico (carga hidráulica, altura piezométrica e pressões neutras).

# 6

## ANÁLISE DE ESTABILIDADE

### 6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita a análise de estabilidade dos taludes da barragem modelo para a situação de esvaziamento rápido (60 horas).

A análise de estabilidade de estruturas de terra é um dos tipos de análise numérica mais antiga. A ideia de discretizar possíveis deslocamentos de massas em fatias foi introduzida no início do século 20. O método de equilíbrio limite foi aceite, de forma generalizada, pela comunidade geotécnica pois permitia a obtenção de soluções através de cálculos manuais ou, mais recentemente, em folhas de cálculo. Com o avanço da tecnologia foi possível efetuar o processo de forma automatizada, e por essa via desenvolver técnicas e formulações matemáticas mais avançadas e eficientes, capazes de analisar problemas cada vez mais complexos.

São utilizados os programas SLOPE/W e SLIDE para estimar os fatores de segurança nas diferentes etapas do esvaziamento da barragem, analisando a estabilidade através das superfícies de escorregamento, dos taludes a montante e jusante, durante 120 dias após o início de dito esvaziamento.

É esperado que as mesmas superfícies sejam aproximadamente circulares; a análise da estabilidade dos taludes é obtida através da comparação do fator de segurança resultante do SLOPE/W e SLIDE para a cunha de rotura de maior probabilidade de ocorrência, com o menor fator de segurança.

Programas como o SLOPE/W oferecem grandes recursos para a análise da estabilidade de taludes e apresentação dos respetivos resultados, sendo por isso um dos escolhidos no âmbito desta dissertação. Este programa permite contemplar estratigrafias complexas, pressões de água com variação no espaço e no tempo, cargas concentradas, estruturas de suporte, ação sísmica, etc.

O SLOPE/W integra um conjunto de programas modulares da GeoStudio, no qual se conta o SEEP/W, que podem ser utilizados de forma integrada, com partilha de informação e interação entre módulos no decorrer da análise ao longo do tempo.

O SLIDE é um programa da RocScience para a análise da estabilidade de taludes, integrando o método de elementos finitos para análise de percolação e tensão/deformação, que resolve questões como esvaziamentos rápidos, análises probabilísticas e dimensionamento de suportes.

O SLIDE permite modelar todo o tipo de materiais rochosos e solos. Aterros, barragens de aterro e muros de suporte são facilmente analisados, sendo o tipo de modelação bastante semelhante ao do RS2. Permite ainda avaliar o fator de segurança e probabilidade de rotura das estruturas referidas, recorrendo a uma divisão em fatias de faces verticais ou inclinadas no contexto do método de equilíbrio limite.

Este foi o programa escolhido para a análise de estabilidade dos taludes da barragem modelo, sendo os resultados obtidos comparados com os obtidos por via do SLOPE/W.

O método escolhido para o cálculo do fator de segurança foi o método de Bishop, em ambos os programas, pois é um método que conduz a resultados pelo lado da segurança e com erros, em regra geral, muito pequenos.

O Regulamento de Segurança de Barragens (Nº 213, Artigo 47) exige que se cumpram certos fatores de segurança em condições distintas durante a vida de barragens, que são para situações correntes:

- 1,4 - Fase de construção;
- 1,5 - Fase de pleno armazenamento;
- 1,3 - Esvaziamento rápido;
- 1,0 - Condições sísmicas.

Da mesma forma que no capítulo 5, são descritos os passos necessários à modelação nos dois programas, e apresentados posteriormente os resultados em paralelo.

## **6.2. ESTABILIDADE DE MONTANTE - SLOPE/W**

O programa SLOPE/W utilizou dados usados no SEEP/W, visto que os programas do GeoStudio funcionam em esquema de árvore como já anteriormente explicado. São criados dois ficheiros, uma para análise de montante e outro para jusante.

É então adicionado um novo ficheiro do tipo SLOPE/W *Analyses- Limit Equilibrium*.

Este novo ficheiro tem como precedente o ficheiro SEEP/W da análise de esvaziamento rápido, sendo desta forma a geometria, características dos materiais e malha automaticamente importados. Para isso no campo *Parent* é então selecionado o ficheiro SEEP/W referido; no campo *PWP Conditions* é selecionada a opção *Parent Analyses* conforme mostra a Fig. 6.1. é ainda selecionada a opção *all* no campo *Time* para que o programa analise todas as etapas anteriormente descritas (0 segundos, 6 horas, 12 horas, etc).

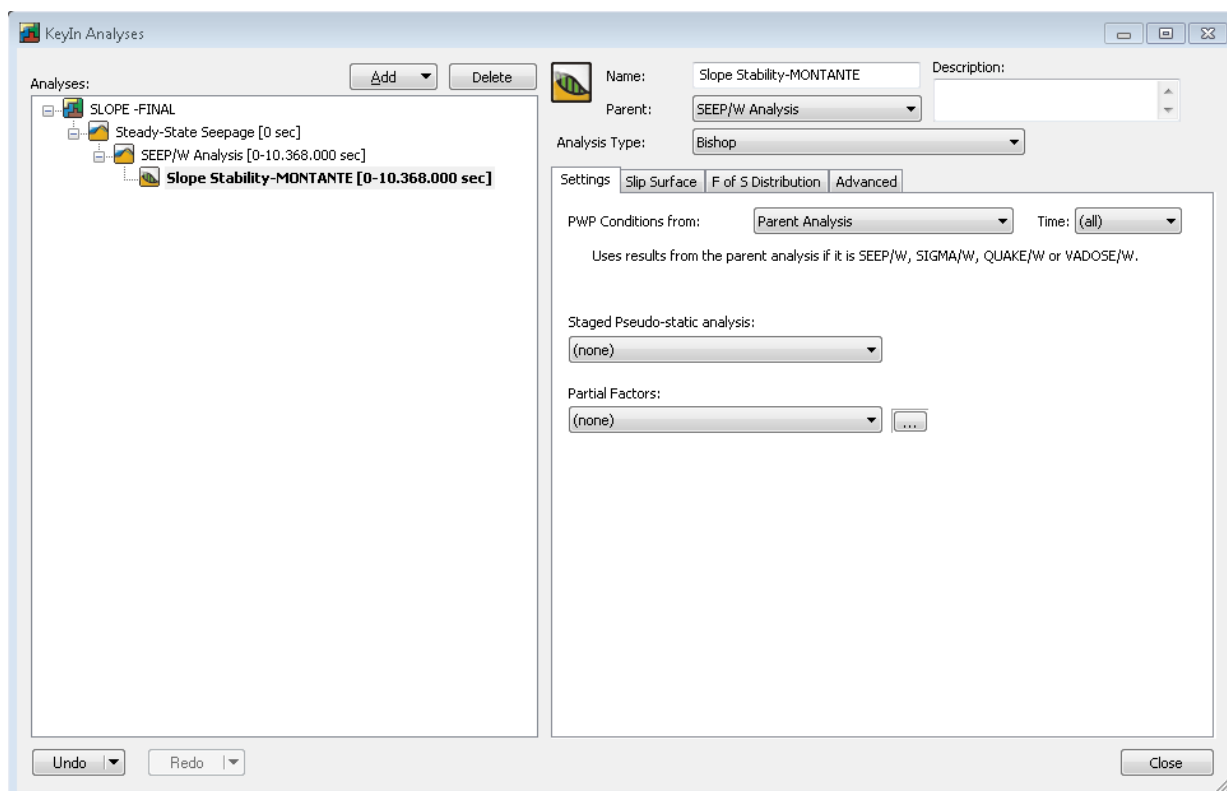


Fig. 6.1 – SLOPE/W - Menu Análises.

Dado que se trata da análise de montante é seleccionada a opção *Right to left* no separador *Slip Surface*. O método escolhido será o de *Grid and Radius*, que não é mais que o método de fatias usualmente utilizado para cálculos de fatores de segurança.

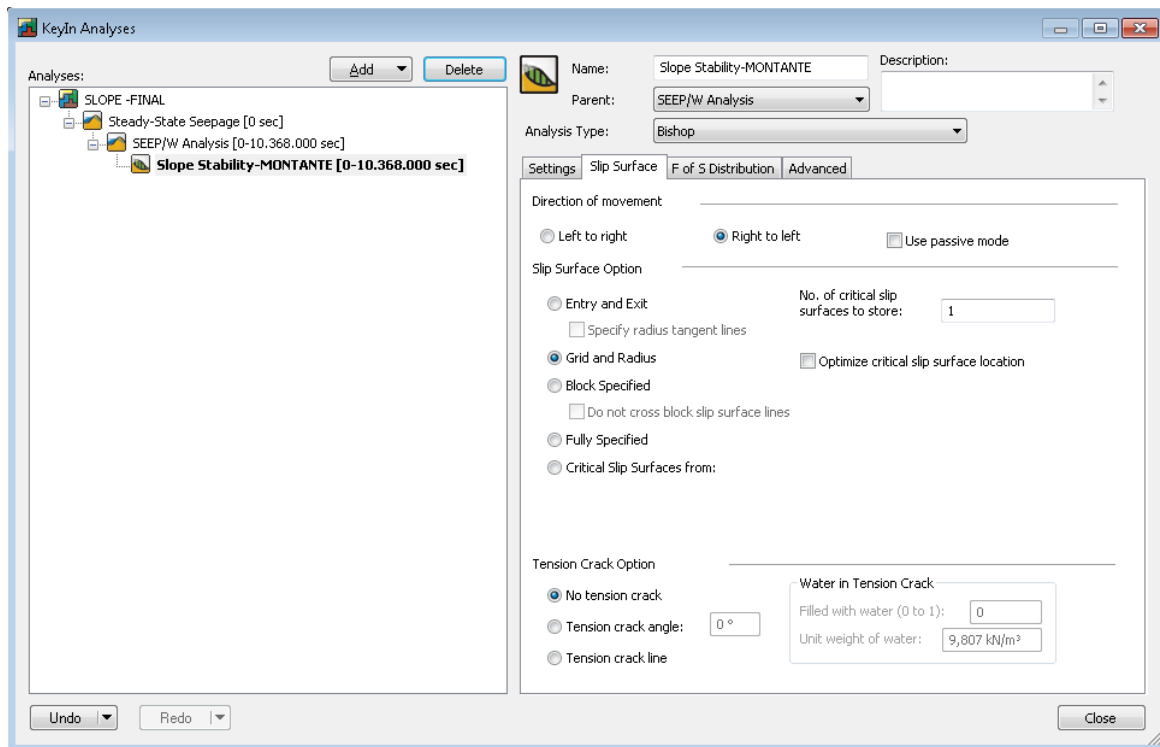


Fig. 6.2 – SLOPE/W - Superfícies de escorregamento.

A distribuição do fator de segurança escolhida é a constante, conforme ilustra a Fig. 6.3.

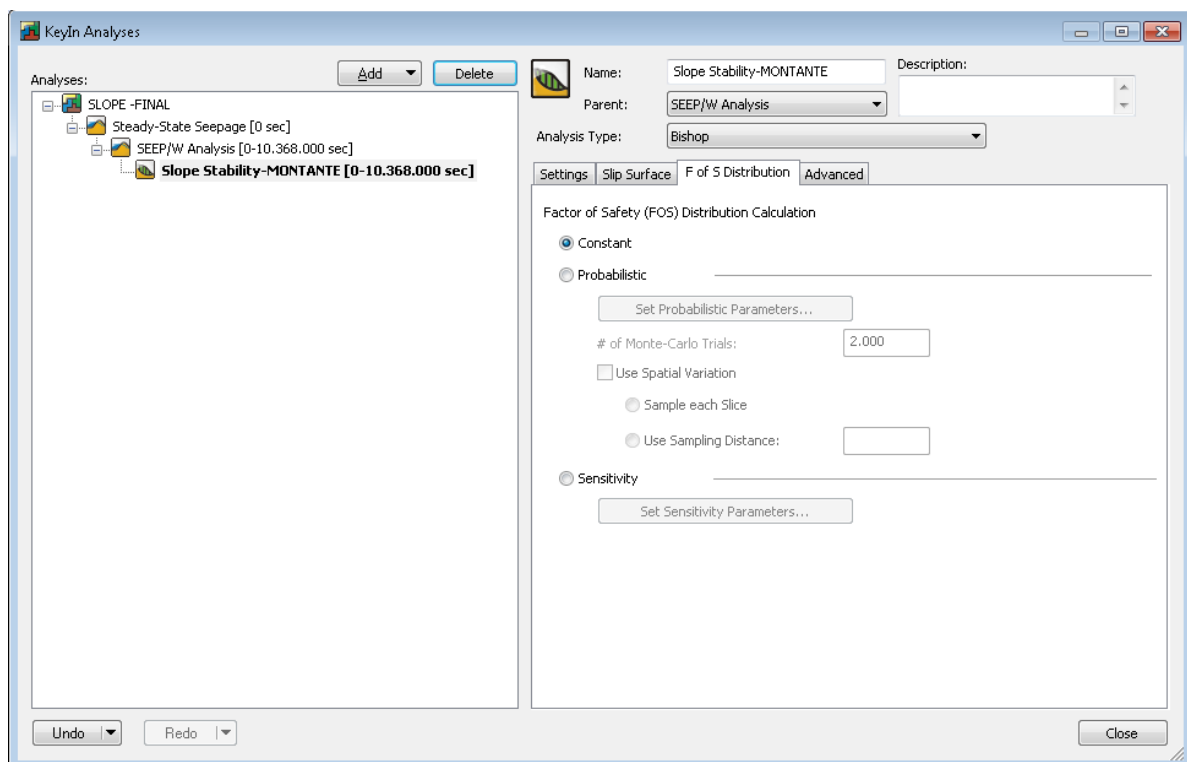


Fig. 6.3 – SLOPE/W - Distribuição do fator de segurança.

No separador *Advanced* é seleccionado o número máximo de iterações e a tolerância para a obtenção dos fatores de segurança nos diferentes tempos em análise. Foi escolhido um número de fatias igual a 50.

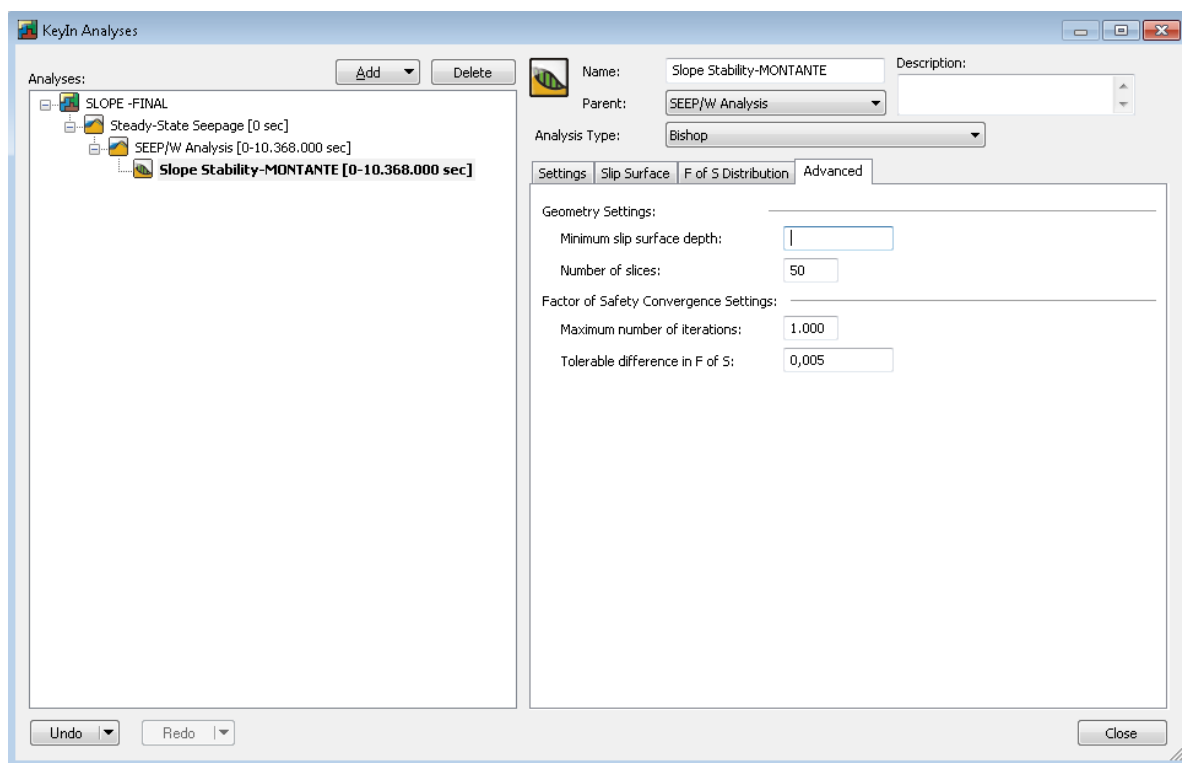


Fig. 6.4 – SLOPE/W - Definições avançadas.

Da mesma forma que foram escolhidas as opções de convergência para o fator de segurança, é também necessário seleccionar o mesmo para a análise *Steady-State* e *Transient*, passos estes que são descritos nas Figs 6.5. e 6.6.

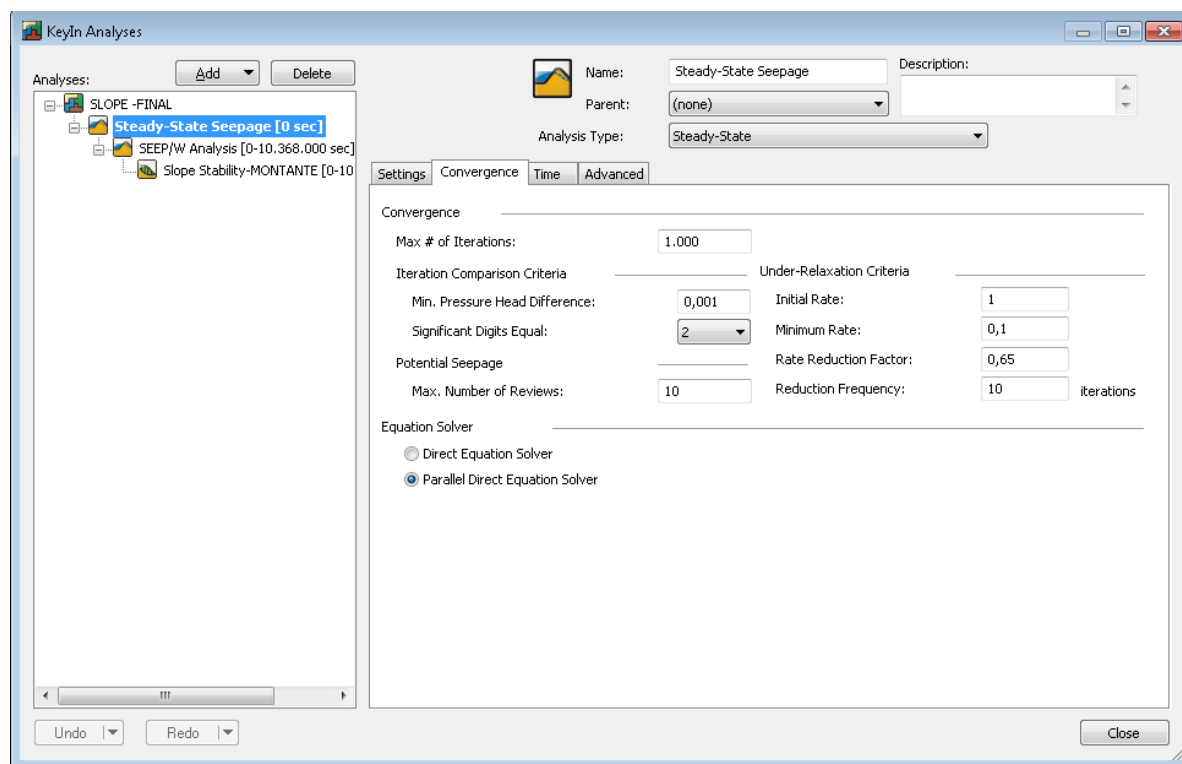


Fig. 6.5 – SLOPE/W - Parâmetros de convergência.

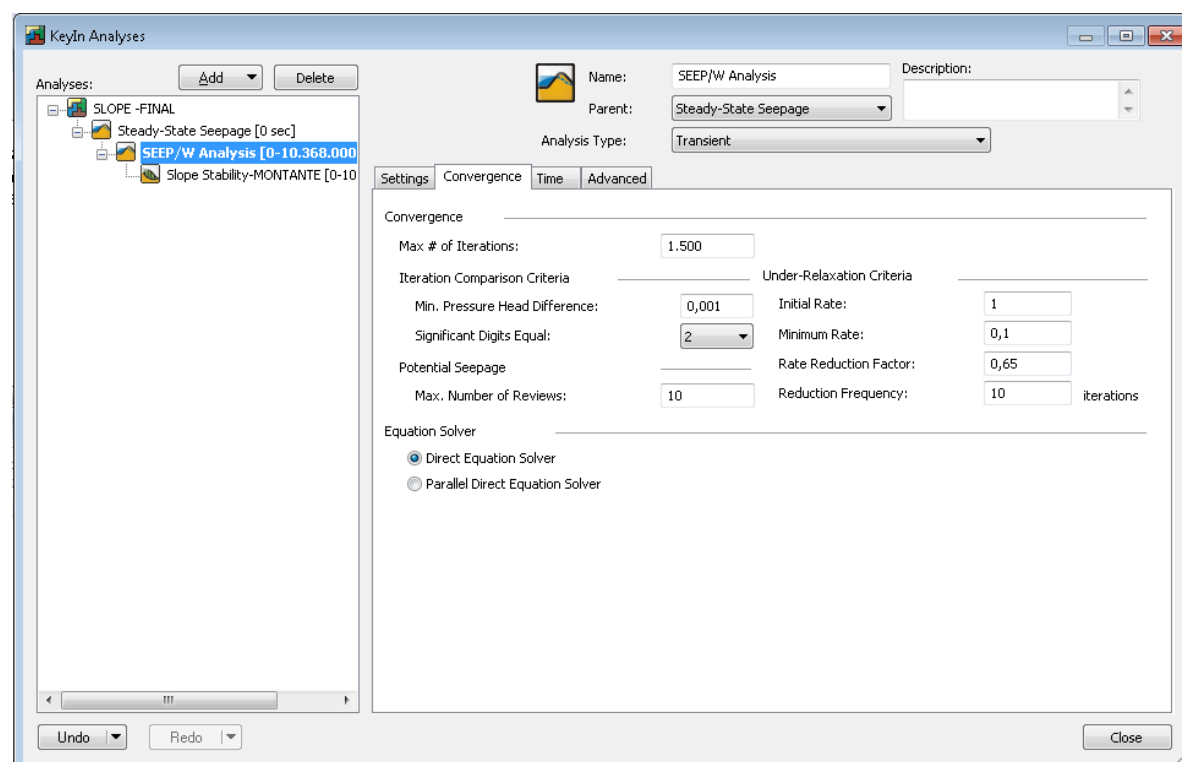


Fig. 6.6 – SLOPE/W - Parâmetros de convergência do regime transitório.



Como referido, as características hidráulicas dos materiais, como a função de condutividade e a função teor em água volumétrico são automaticamente importadas do ficheiro SEEP/W. Porém, para a análise da estabilidade de taludes é necessário definir as características mecânicas dos respetivos materiais (peso volúmico, coesão e ângulo de atrito).

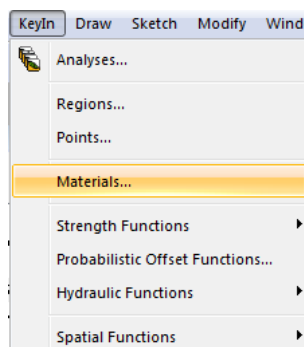


Fig. 6.7 – SLOPE/W - Adicionar materiais.

Para cada material constituinte da barragem é inserido o peso volúmico, coesão e ângulo de atrito.

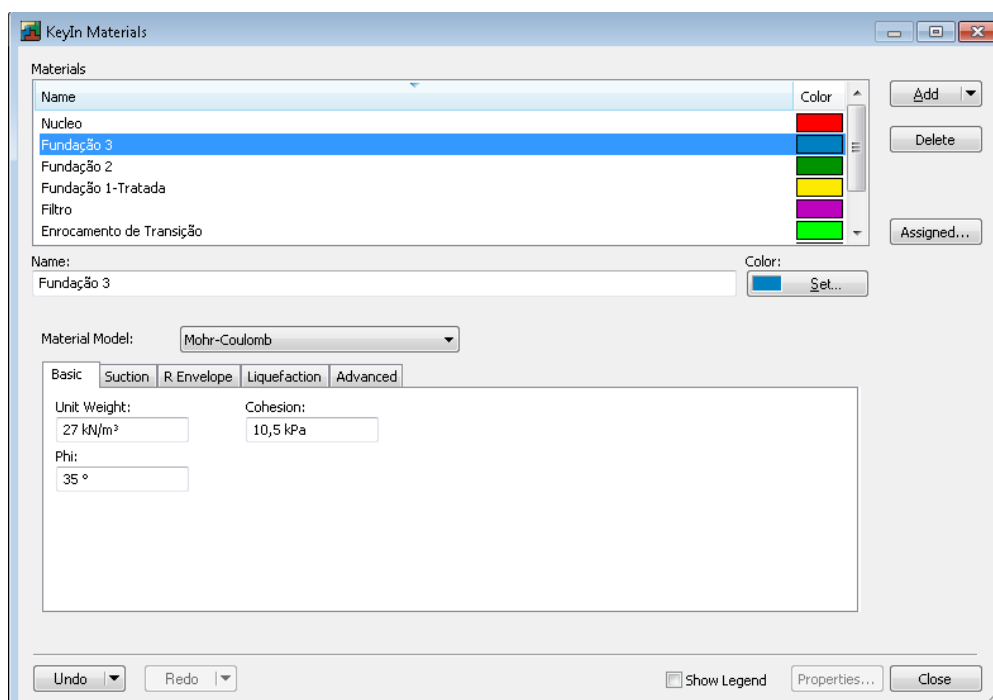


Fig. 6.8 – SLOPE/W - Definição da. Fundação 3.

É necessário repetir este passo para os restantes materiais.

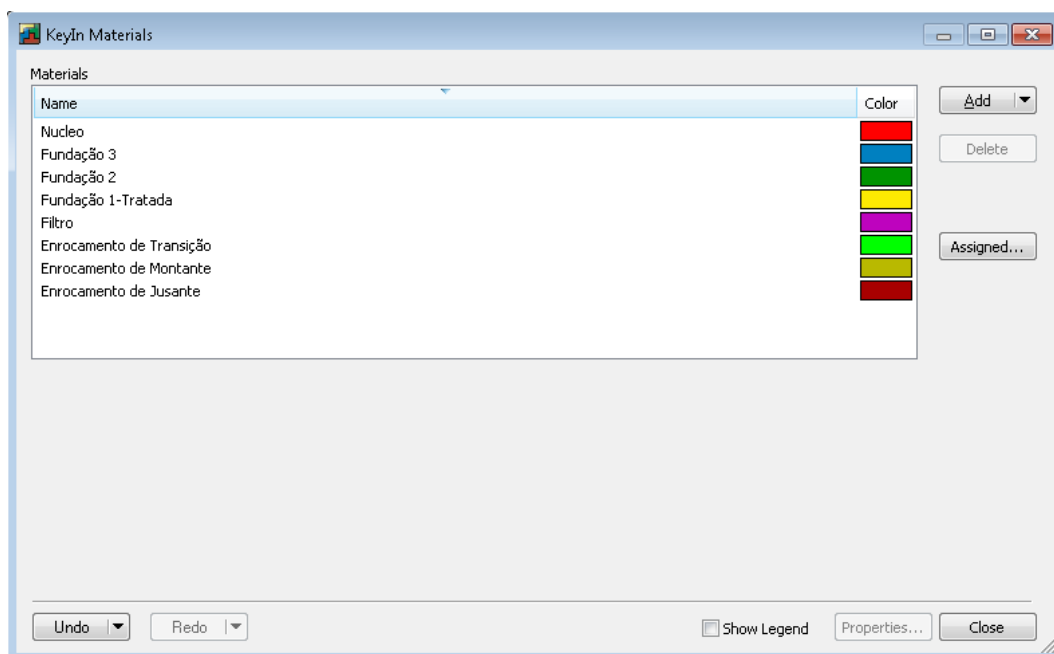


Fig. 6.9 – SLOPE/W - Definição de materiais.

O Quadro 6.1 descreve as características mecânicas dos materiais constituintes das várias zonas da barragem.

Quadro 6.1. – Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Peso volúmico (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Núcleo	16,6	9	30
Enrocamento de Montante	22,6	9	45
Enrocamento de Jusante	22,6	9	42
Enrocamento de Transição	22,6	9	42
Filtro	17,5	9	35
Fundação 3	27	10,5	35
Fundação 2	27	10,5	35

Estando definidos os materiais, resta agora a definição da grelha, raio e limites para se proceder à análise propriamente dita. Para isso acede-se ao menu *Slip Surface*.

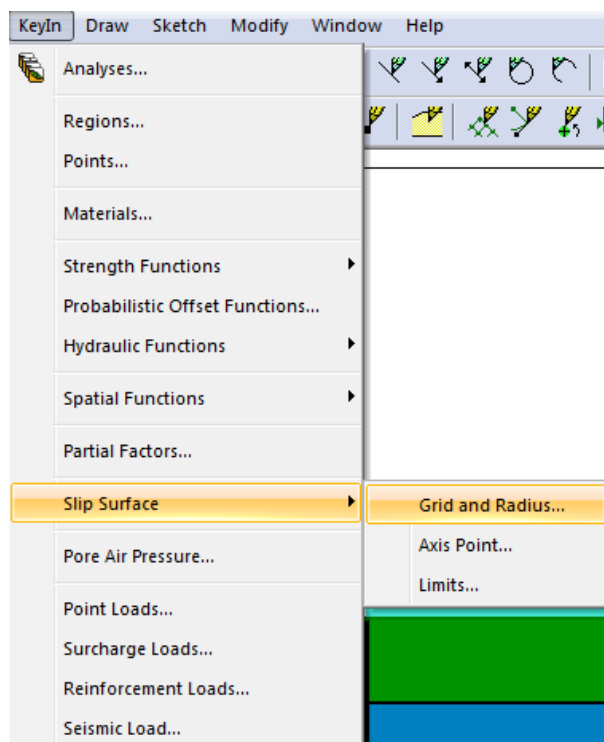


Fig. 6.10 – SLOPE/W - Superfícies de escorregamento.

São inseridas as coordenadas da grelha, que é dividida em 10 linhas horizontais e 10 verticais, cuja interceção corresponde ao centro das superfícies de deslizamento circulares utilizadas no método de Bishop. Neste menu são também configurados os limites dos raios, assim como os seus incrementos.

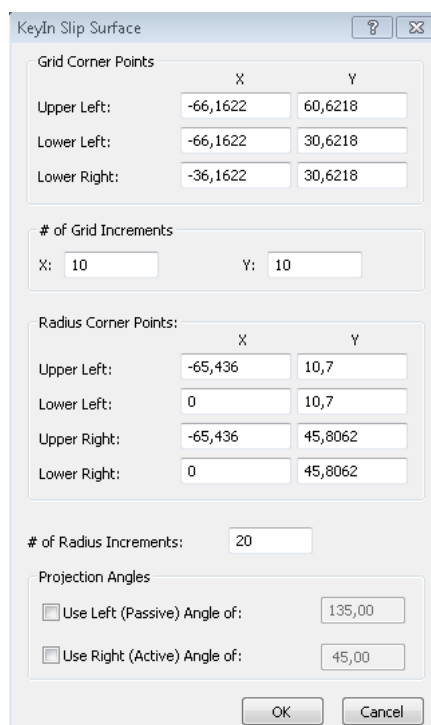


Fig. 6.11 – SLOPE/W - Definição da grelha e raios de montante.

A Fig. 6.12 mostra os limites definidos para a análise da estabilidade de montante segundo o programa SLOPE/W.

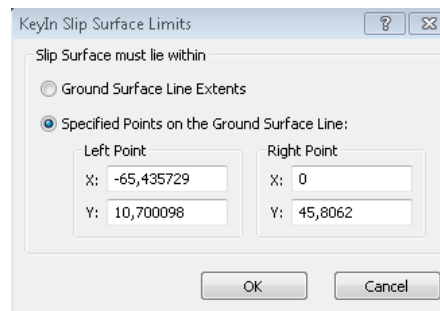


Fig. 6.12 – SLOPE/W - Definição dos limites de montante.

Estão concluídas todas as definições para a análise de estabilidade de montante; os resultados serão apresentados na secção 6.6 em paralelo com os obtidos pelo programa SLIDE.

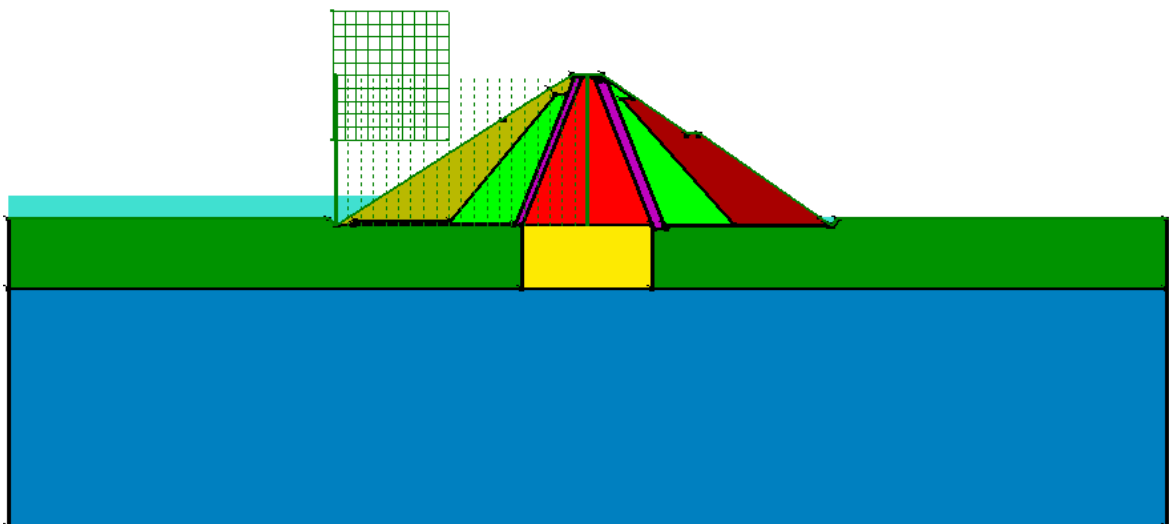


Fig. 6.13 – SLOPE/W - Caracterização completa de montante.

### 6.3. ESTABILIDADE DE JUSANTE-SLOPE/W

Para a modelação da análise de estabilidade de jusante são apenas descritos os passos em que esta difere da de montante referida na secção 6.2.

O primeiro passo é adicionar um novo ficheiro SLOPE/W ao já existente.

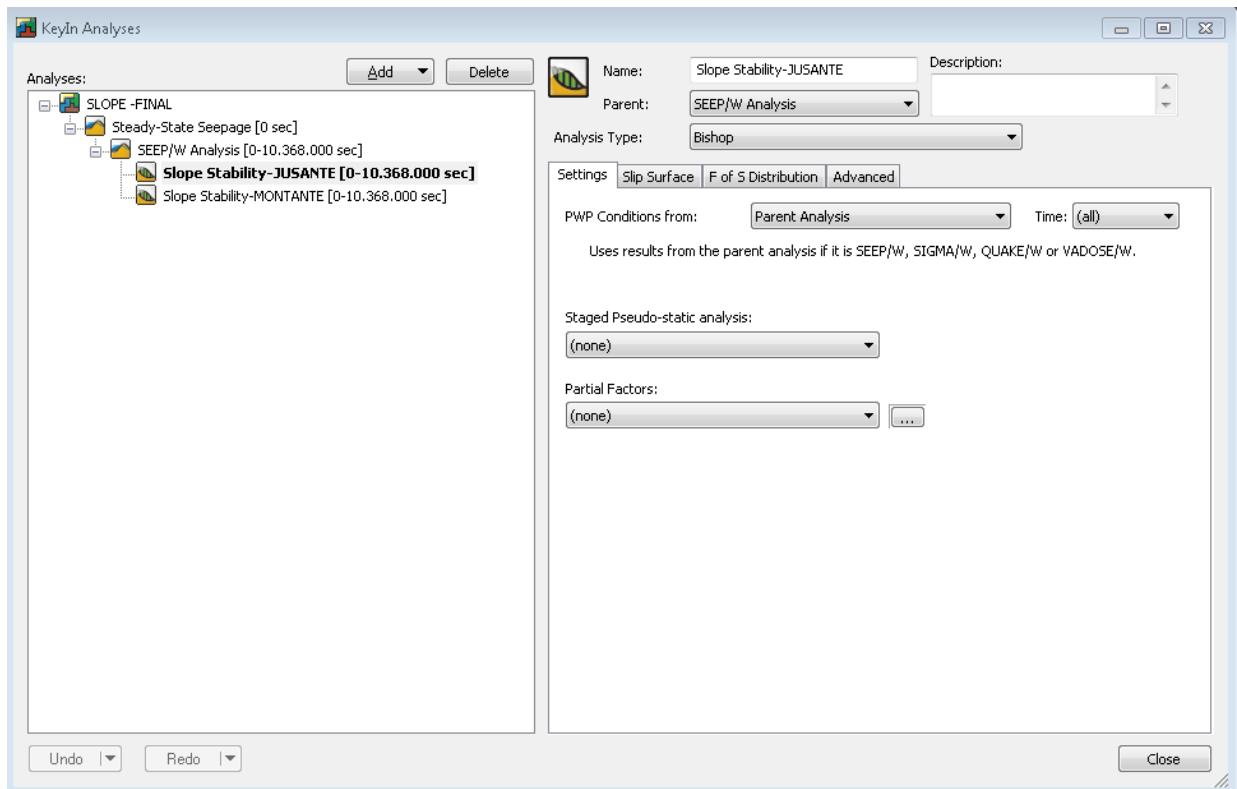


Fig. 6.14 – SLOPE/W - Menu Análises.

Tratando-se da análise de jusante é seleccionada a opção *Left to Right* no separador *Slip Surface*. O método escolhido será o mesmo, *Grid and Radius*.

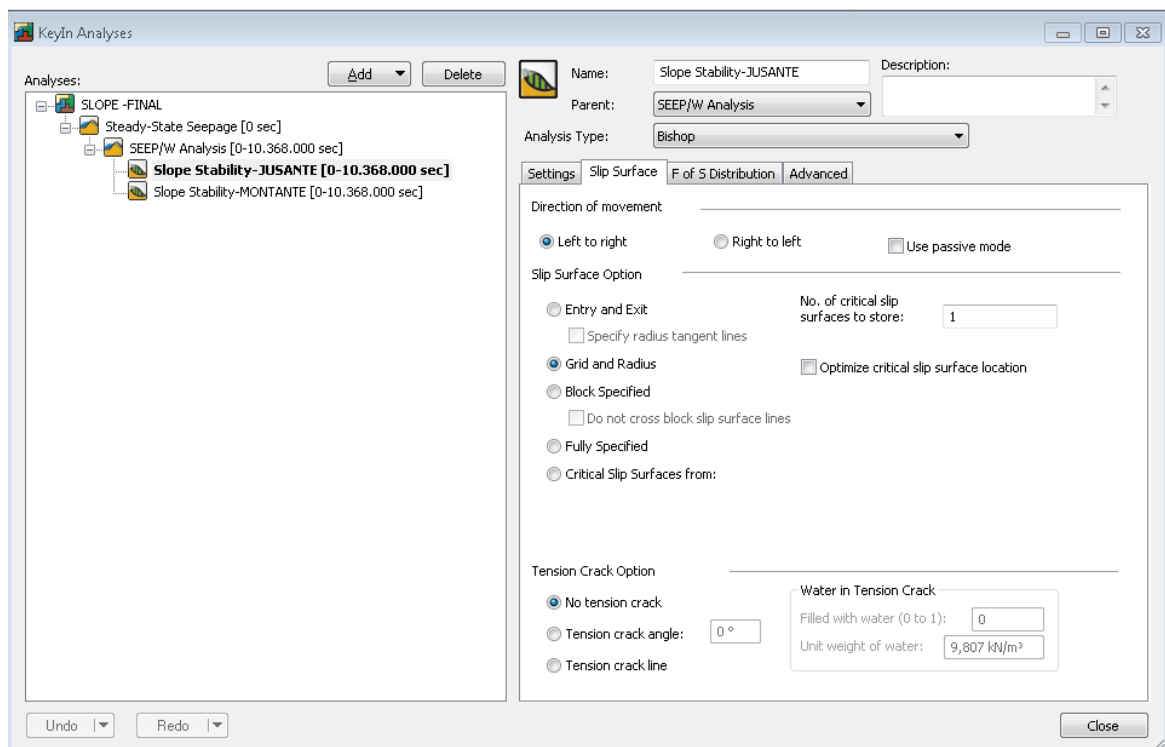


Fig. 6.15 – SLOPE/W - Superfície de escorregamento de jusante.

As características mecânicas dos materiais são as mesmas descritas anteriormente, pelo que será agora apresentada a definição da nova grelha, raios e limites.

São inseridas as coordenadas da grelha para a análise de estabilidade a jusante. Esta será ainda dividida em 15 linhas horizontais e 15 verticais.

Fig. 6.16 – SLOPE/W - Definição da grelha e raios de jusante.

Adotou-se uma grelha de maiores dimensões a jusante, como o objetivo de averiguar a influência da mesma na obtenção de soluções.

Fig. 6.17 – SLOPE/W - Definição dos limites de jusante.

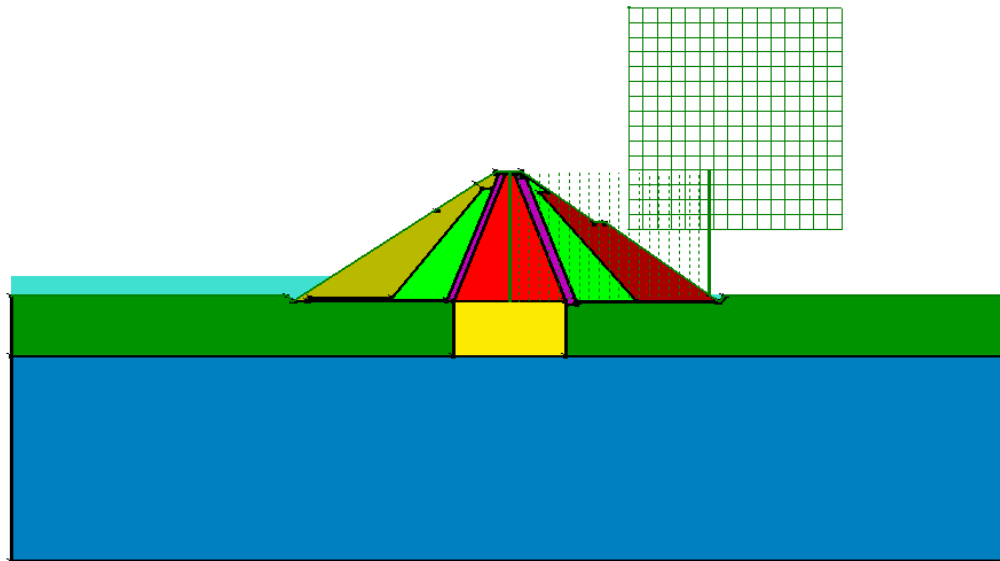


Fig. 6.18 – SLOPE/W - Caracterização completa de jusante.

#### 6.4. ESTABILIDADE DE MONTANTE-SLIDE

São agora apresentados os passos necessários à modelação para a análise da estabilidade de montante no programa SLIDE.

O primeiro passo é a criação de um novo ficheiro, para o qual é importada a geometria do modelo usado anteriormente; no entanto, dado que se trata de um novo programa é necessária a caracterização dos materiais.

Sendo uma análise a montante, é seleccionada a direção *Right to Left*. Neste menu é ainda possível escolher as unidades pretendidas.

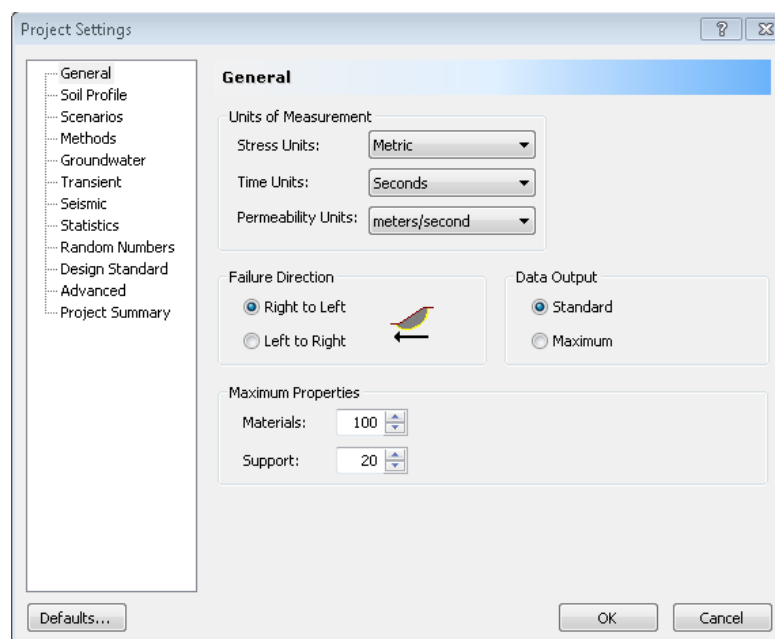


Fig. 6.19 – SLIDE - Definições do projeto de montante.

No separador *Methods* é escolhido o método de Bishop tal como no SLOPE/W, de forma a serem o mais semelhantes possível os resultados obtidos. Ainda neste separador é fixado o número de fatias igual a 50, bem como o máximo número de iterações e tolerância igual à escolhida na análise pelo SLOPE/W.

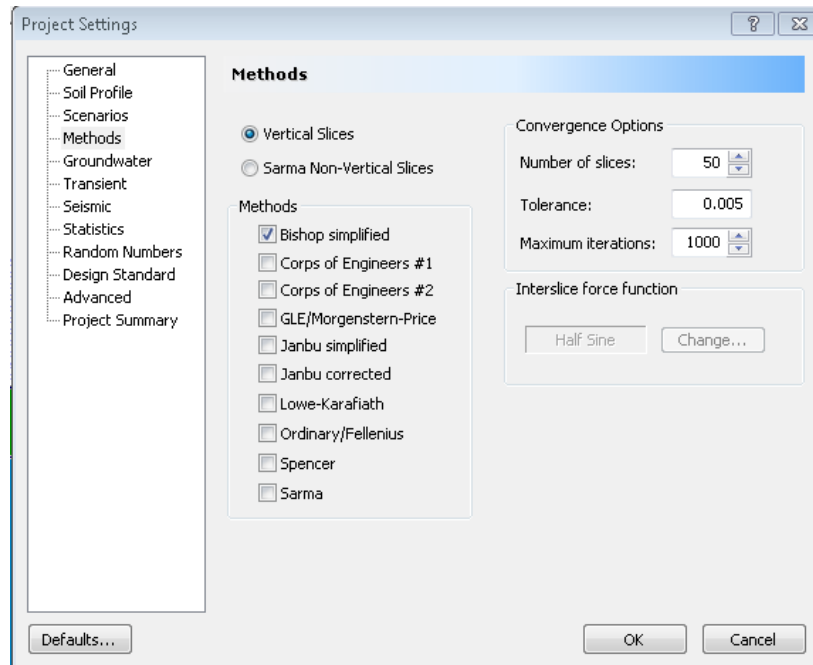


Fig. 6.20 – SLIDE - Definição do método de análise.

No separador *Groundwater* é escolhida nas opções avançadas a análise *Transient*, dado que se pretende obter os fatores de segurança ao longo da operação de esvaziamento da barragem.

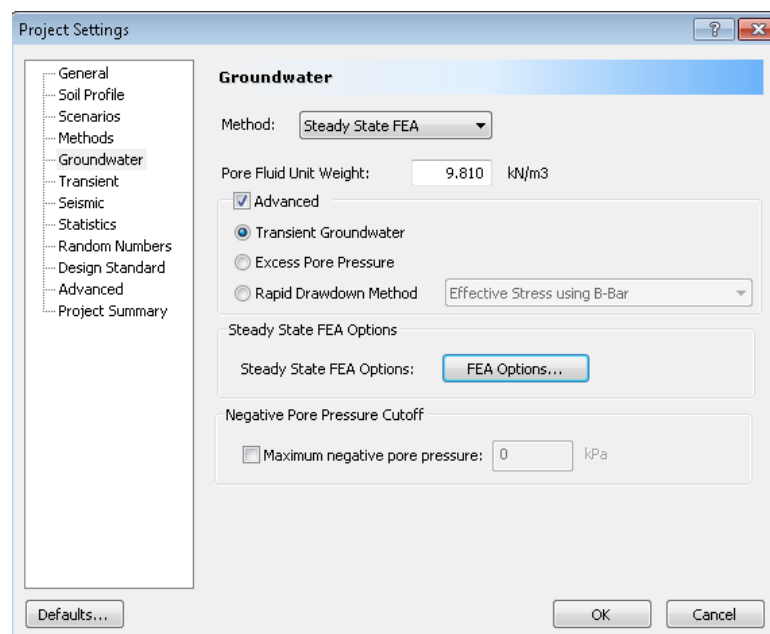


Fig. 6.21 – SLIDE - Definição da análise transitória.



Ainda neste menu são escolhidas as opções de convergência para esta análise, número máximo de iterações e tolerância. Apesar de se tratar de uma modelação ao longo do tempo, o ficheiro parte de um estado inicial do tipo Steady-State.

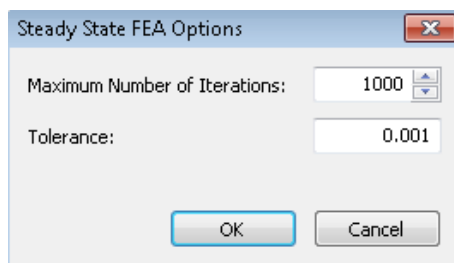


Fig. 6.22 – SLIDE - Parâmetros de convergência para a análise estacionária.

O separador *Transient*, permite escolher os tempos para os quais se pretende obter os fatores de segurança. São escolhidos os mesmos momentos que no SLOPE/W.

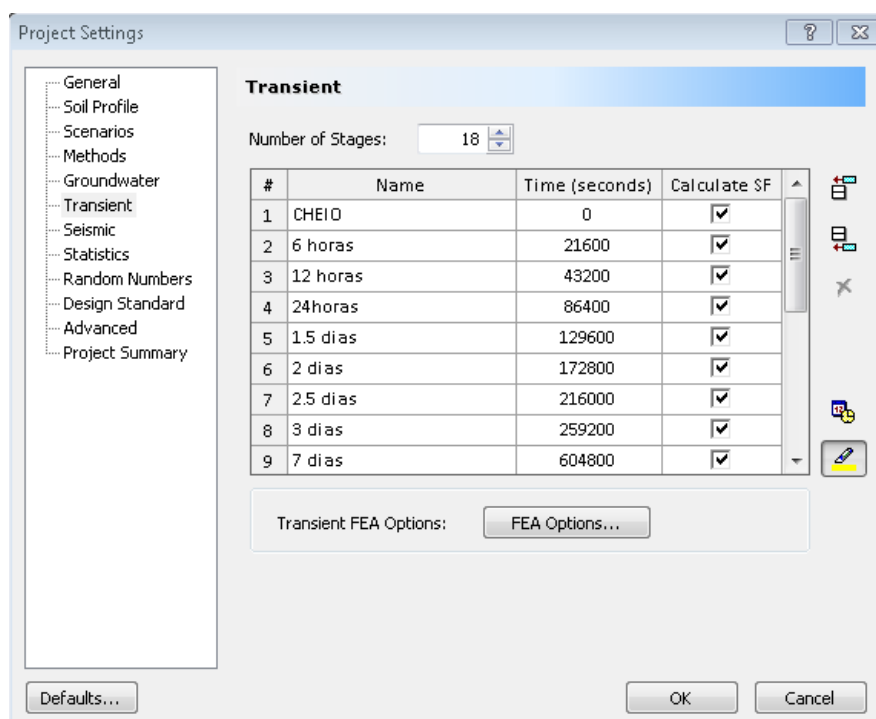


Fig. 6.23 – SLIDE - Definição do tempo de análise.

Ainda neste separador são introduzidos os parâmetros de convergência ilustradas na Fig. 6.24.

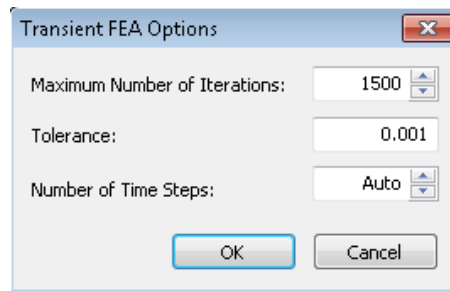


Fig. 6.24 – SLIDE - Parâmetros de convergência do regime transitório.

Não são alteradas quaisquer outras definições no menu *Project Settings*.

O próximo passo é a definição das características mecânicas e hidráulicas dos materiais. Estas definições são introduzidas em separadores distintos. No separador *Slope Stability* são introduzidas as características mecânicas e no *Transient Groundwater* as hidráulicas.

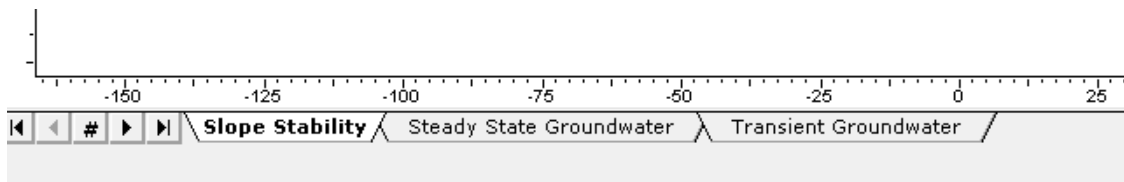


Fig. 6.25 – SLIDE - Separadores.

Começando pelas propriedades mecânicas, com o botão do rato do lado direito, clica-se no material a definir, seleccionando o botão *Material Properties*.

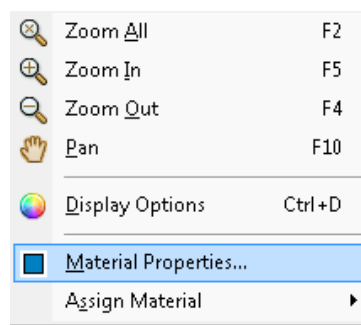


Fig. 6.26 – SLIDE - Propriedades dos materiais.

São inseridas as propriedades mecânicas, peso volúmico, coesão e ângulo de atrito para cada material constituinte da barragem. As propriedades serão as mesmas usadas no SLOPE/W, sintetizadas no Quadro 6.1. A Fig. 6.27 serve como exemplo desta definição, sendo necessário repetir este processo para os demais materiais.

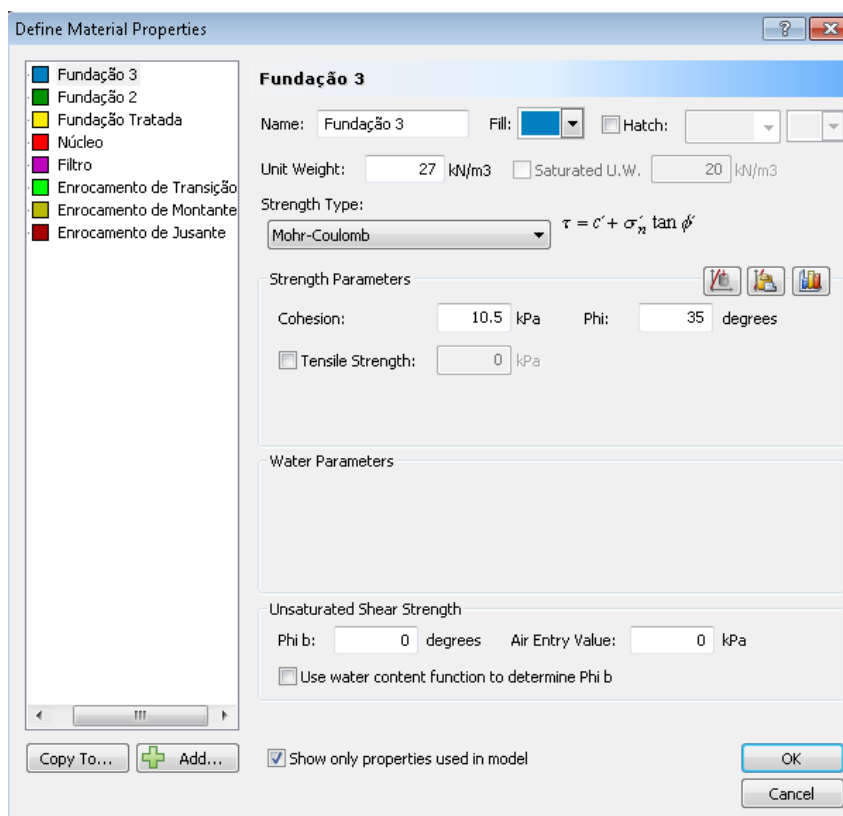


Fig. 6.27 – SLIDE - Definição das propriedades mecânicas da Fundação 3.

Acedendo ao separador *Transient Groundwater*, serão definidas agora as propriedades hidráulicas, nomeadamente as funções de condutividade e de retenção.

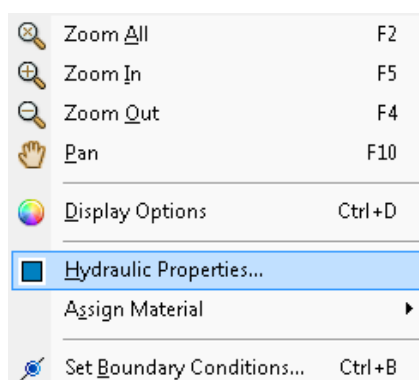


Fig. 6.28 – SLIDE - Propriedades hidráulicas.

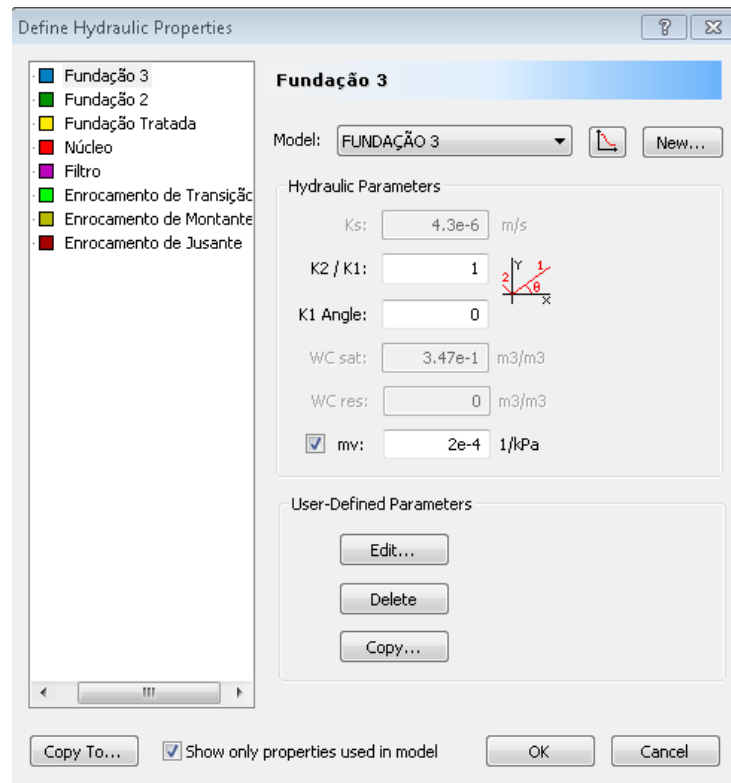


Fig. 6.29 – SLIDE - Definição das propriedades hidráulicas da Fundação 3.

Através do botão *Edit* são inseridos os dados necessários à definição das funções acima referidas. Segue-se o exemplo desta definição para o elemento Fundação 3. As coordenadas da função de condutividade e de teor em água volumétrico são exatamente as mesmas que as usadas em simulações anteriores. Tendo os materiais propriedades iguais, os resultados obtidos serão os mais semelhantes possível.

Estas funções podem ser consultadas no Anexo I.

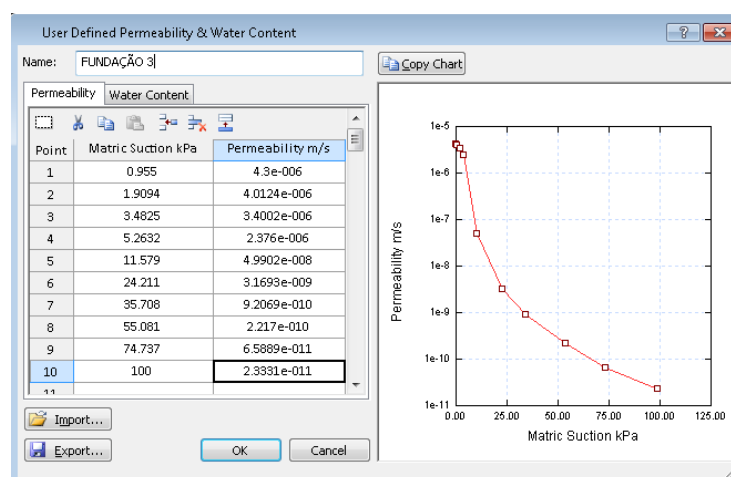


Fig. 6.30 – SLIDE - Função de condutividade da Fundação 3.

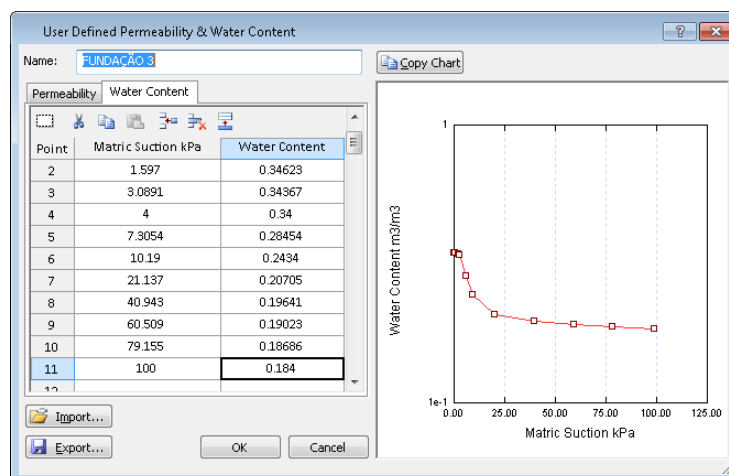


Fig. 6.31 – SLIDE - Função de teor em água volumétrico da Fundação 3.

Estão assim definidas todas as características dos materiais.

É necessário agora definir a função de esvaziamento a montante, dado que a jusante a carga hidráulica permanecerá imutável e com o valor de 12,6 m.

Para isso, ainda neste separador, acede-se ao menu *Mesh* e submenu *Set Transient Boundary Conditions*.

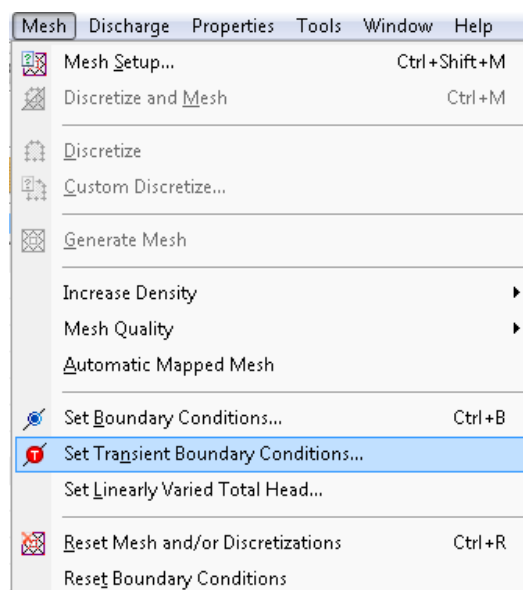


Fig. 6.32 – SLIDE - Definir condições de fronteira.

É definida a evolução temporal da carga hidráulica a montante e são inseridos os tempos em que se pretende determinar o fator de segurança, de forma semelhante ao que foi feito no programa RS2.

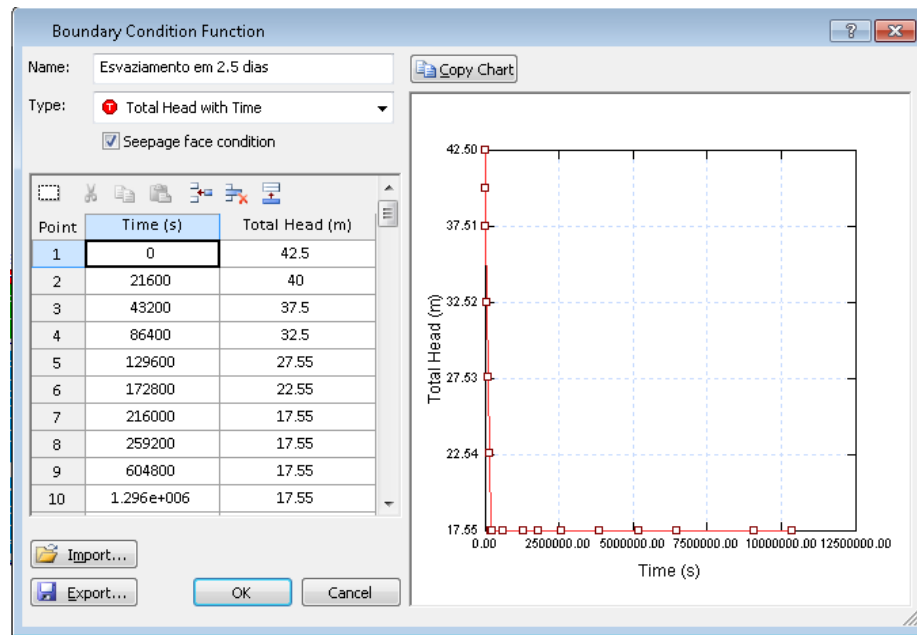


Fig. 6.33 – SLIDE - Definição da função esvaziamento.

Estando definida esta função, resta apenas atribuir a mesma aos segmentos da geometria do modelo afetados.

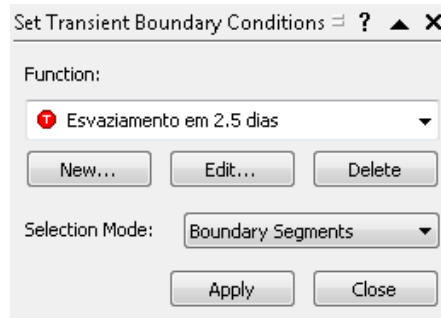


Fig. 6.34 – SLIDE - Atribuição da condição de fronteira a montante.

De forma semelhante é atribuída a carga de 12,6 m a jusante.

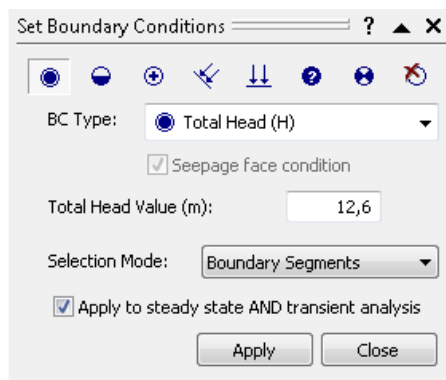


Fig. 6.35 – SLIDE - Atribuição da condição de fronteira a jusante.

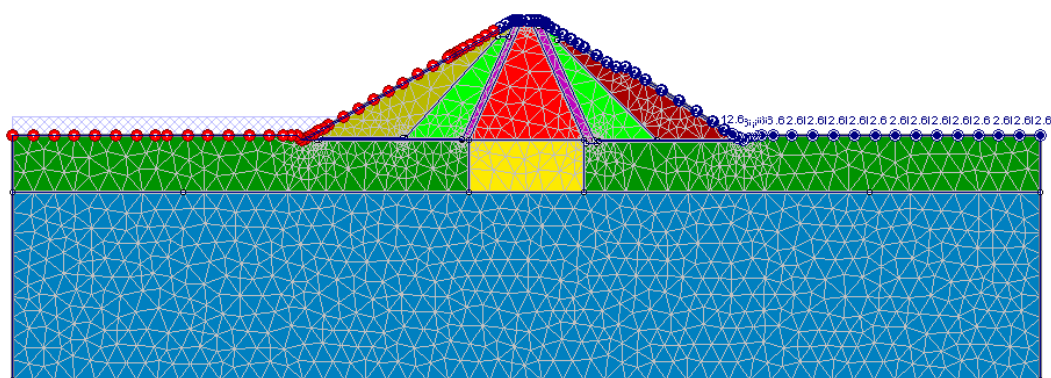


Fig. 6.36 – SLIDE – Definição de materiais e funções de esvaziamento completas.

Estando definidas todas as características mecânicas e hidráulicas dos materiais, assim como as funções de esvaziamento, o próximo passo é a definição dos parâmetros de controlo da análise de estabilidade de taludes pelo método das fatias. Irão ser ilustrados os passos para a caracterização da grelha, raio e limites.

Voltando ao separador *Slope Stability*, no menu *Surface Options*, são configurados os tipos de superfície, neste caso, circulares, assim como os incrementos de raio.

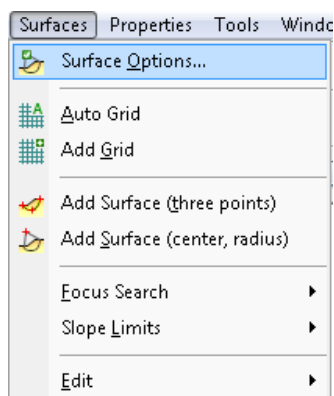


Fig. 6.37 – SLIDE - Opções de superfícies de escorregamento.

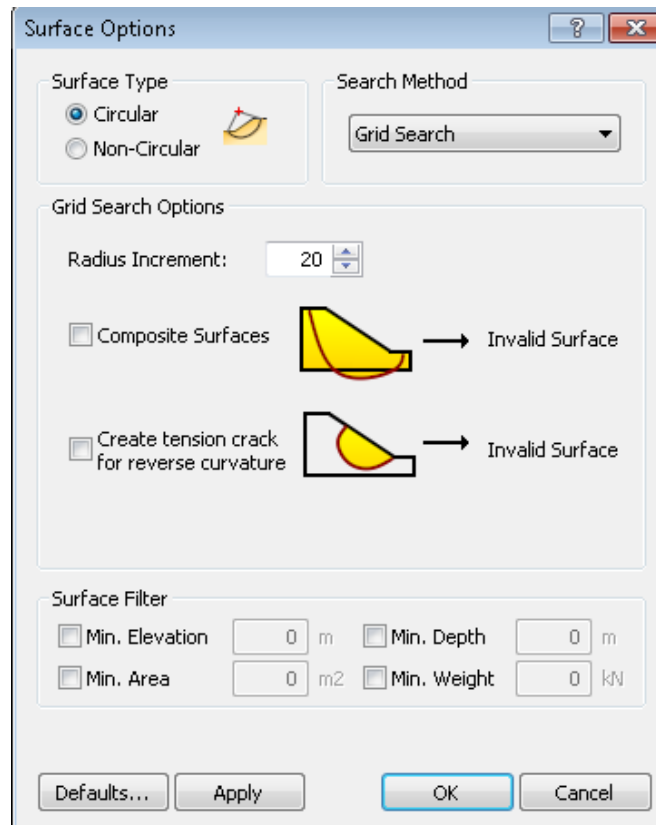


Fig. 6.38 – SLIDE - Definição das superfícies de escorregamento e incrementos dos raios.

É adicionada uma grelha com as mesmas dimensões e coordenadas usadas no programa SLOPE/W. Clicando 2 vezes na mesma podem ser definidos os espaçamentos, que serão os mesmos que os utilizados no referido programa.

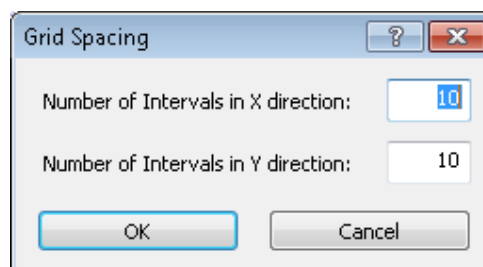


Fig. 6.39 – SLIDE - Espaçamento da grelha.

São ainda definidos os limites para a análise do problema.



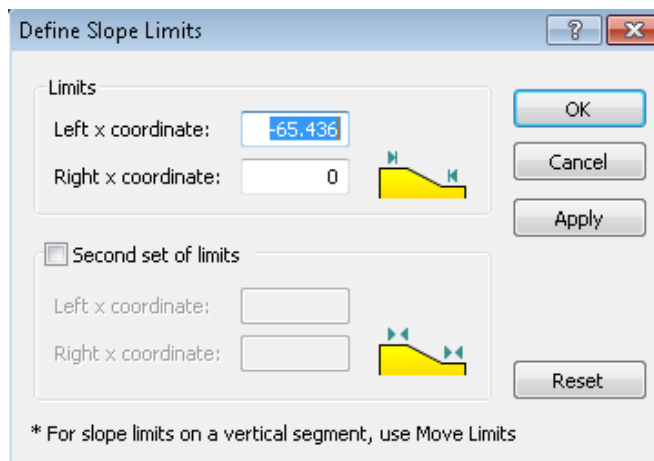


Fig. 6.40 – SLIDE - Definição dos limites de montante.

O programa tem agora todas as definições e pode proceder-se ao cálculo. No menu *Interpret* são apresentados os resultados desta análise, ou seja, os fatores de segurança, para cada um dos tempos pretendidos.

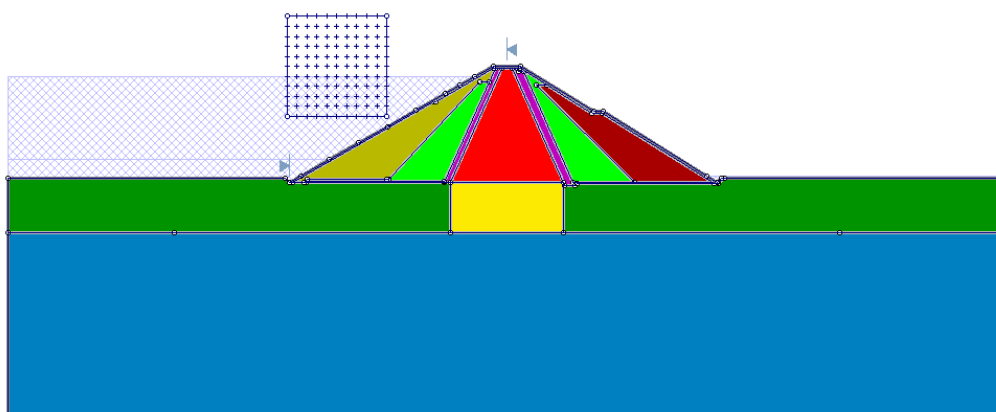


Fig. 6.41 – SLIDE - Caraterização completa de montante.

## 6.5. ESTABILIDADE DE JUSANTE-SLIDE

Será agora apresentado todo o procedimento para a modelação da análise de estabilidade a jusante. Apenas serão descritos, mais uma vez, os passos em que esta diferir da análise a montante.

Novamente o primeiro passo é a criação de um novo ficheiro, sendo importada a geometria do modelo usado anteriormente, e caracterizados os materiais, quer quanto as suas propriedades mecânicas, quer hidráulicas.

Os passos necessários à definição do esvaziamento no modelo são os mesmo que na análise a montante, pelo que não serão incluídos neste subcapítulo.

Dado que se trata da análise a jusante é selecionada a direção *Left to Right*.

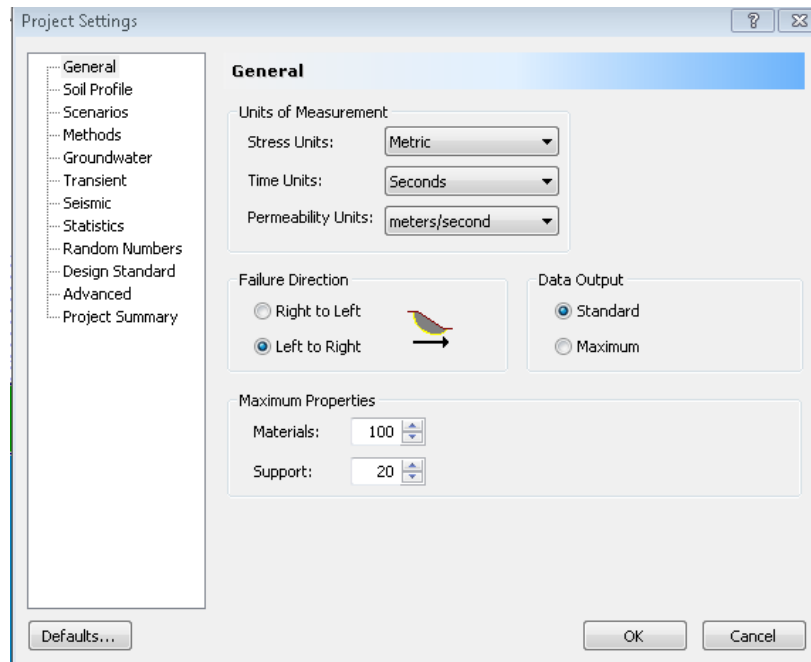


Fig. 6.42 – SLIDE - Definições do projeto de jusante.

As únicas definições que diferem nesta análise são a grelha, os incrementos e os limites.

No separador *Slope Stability*, menu *Surface Options*, são configurados os tipos de superfície, neste caso, circulares, assim como os incrementos de raio.

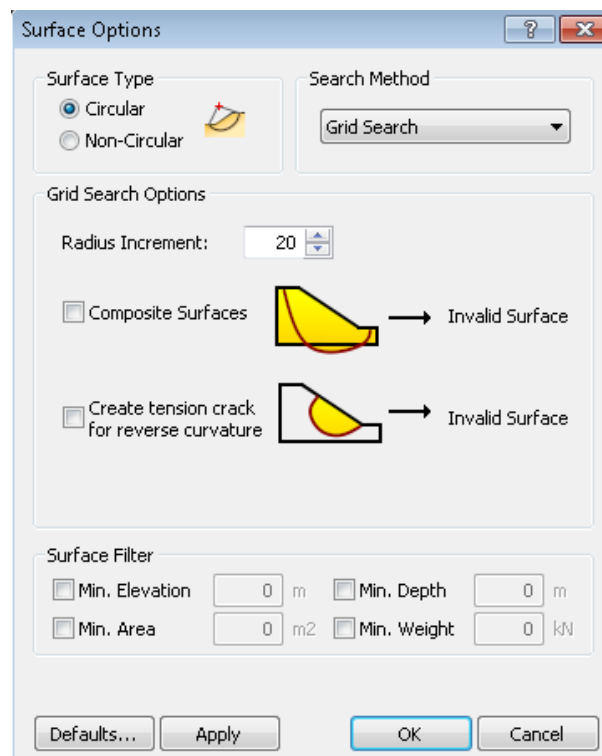


Fig. 6.43 – SLIDE - Definição das superfícies de escorregamento e incrementos dos raios.

É adicionada uma nova grelha com as mesmas dimensões e coordenadas usadas no programa SLOPE/W, para a análise a jusante. Clicando 2 vezes na mesma podem ser definidos os espaçamentos, que serão os mesmos que os utilizados no referido programa, para esta mesma análise.

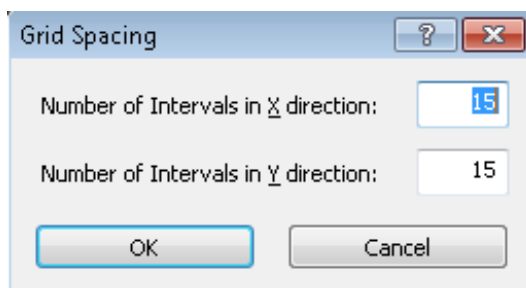


Fig. 6.44 – SLIDE - Espaçamento da grelha.

São ainda definidos os limites para a análise do problema.

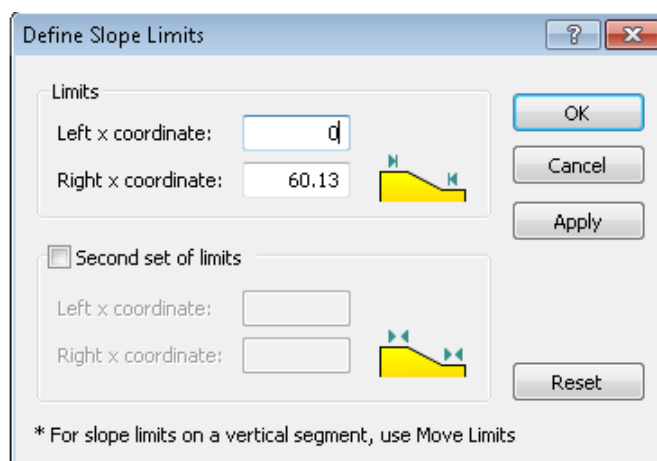


Fig. 6.45 – SLIDE - Definição dos limites de montante.

Estão assim definidas todas as condições e pode proceder-se à computação da solução. Os resultados do *Interpret* são apresentados no subcapítulo 6.6 , em paralelo com os obtidos pelo programa SLOPE/W.

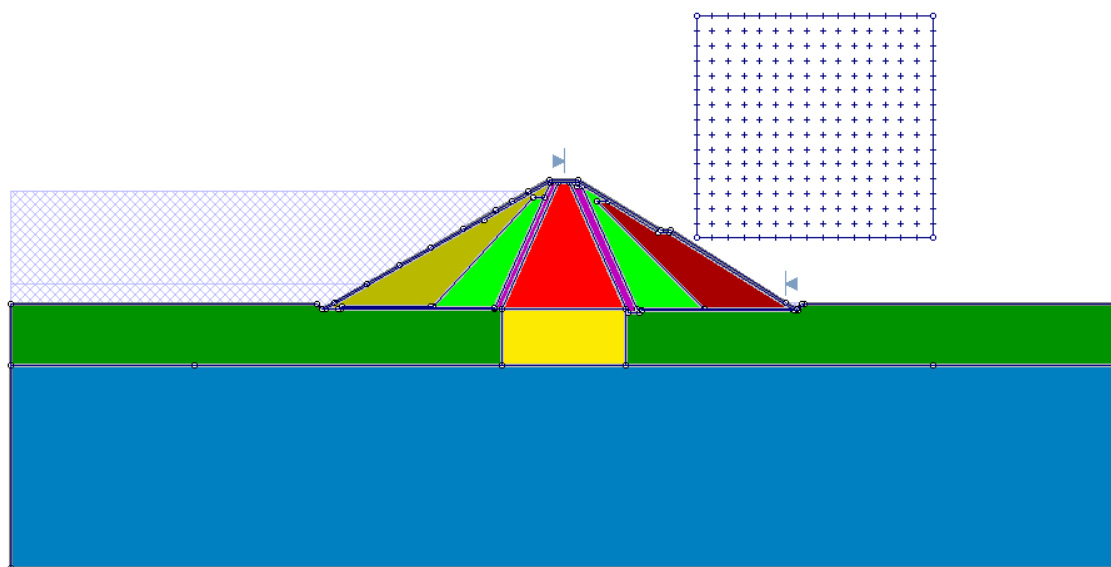


Fig. 6.46 – SLIDE - Caracterização completa de jusante.

## 6.6. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MONTANTE

São apresentados os resultados obtidos para a análise da estabilidade de montante, como sejam, superfícies de escorregamento e o respetivo fator de segurança, correspondentes ao fator de segurança crítico (mínimo) calculado pelos programas para vários dos momentos em análise.

No presente capítulo apenas serão exibidos os resultados para os tempos: 0 segundos, 7 dias, 15 dias, 30 dias e por fim 120 dias. Os restantes resultados podem ser consultados no Anexo III.

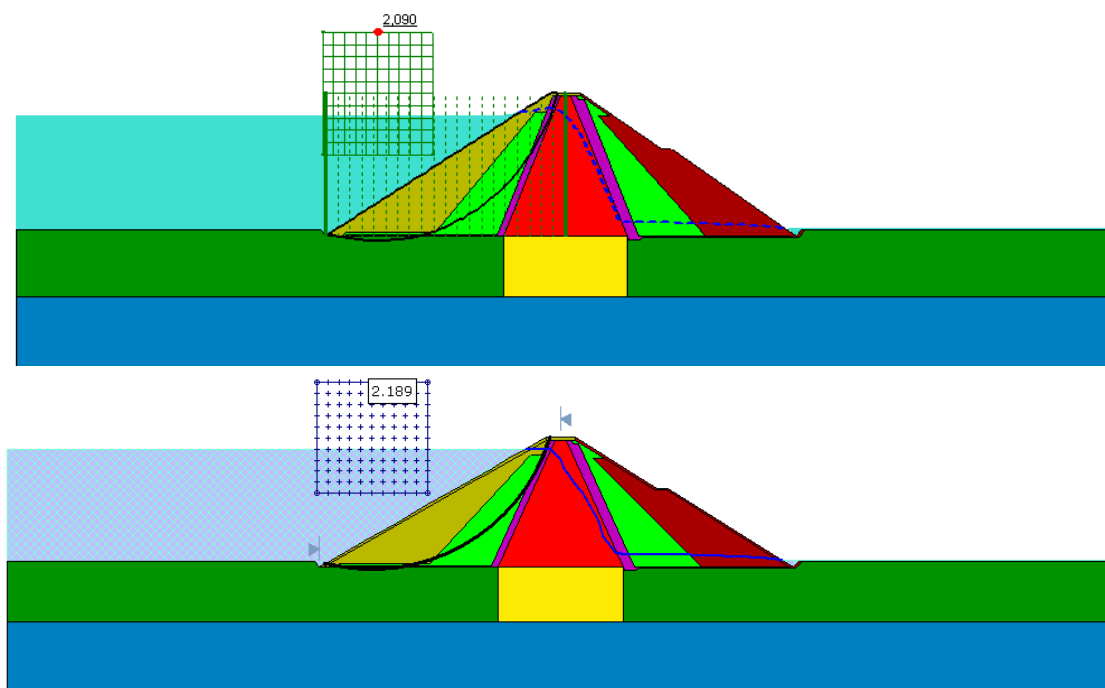


Fig. 6.47 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para o instante inicial.

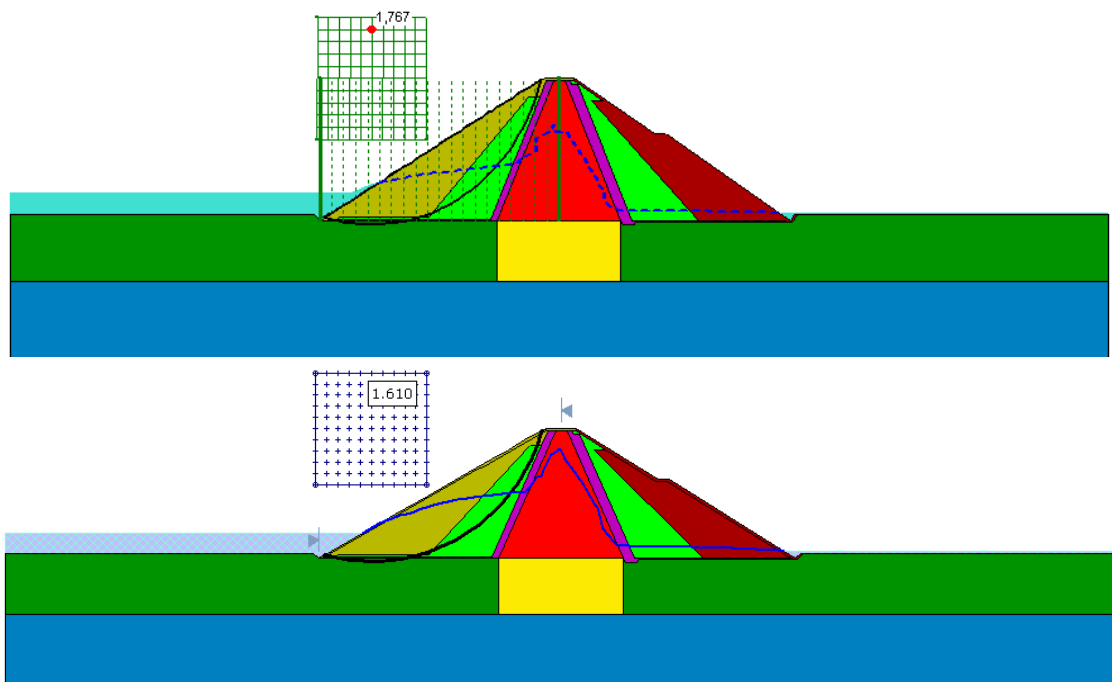


Fig. 6.48 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 7 dias.

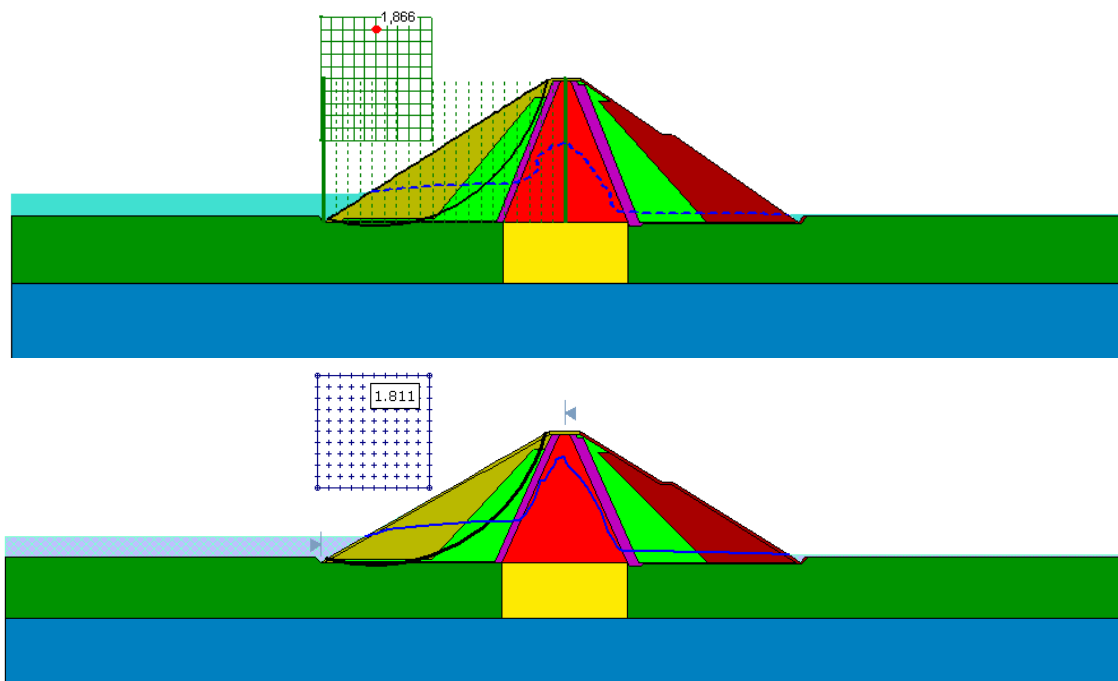


Fig. 6.49 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 15 dias.

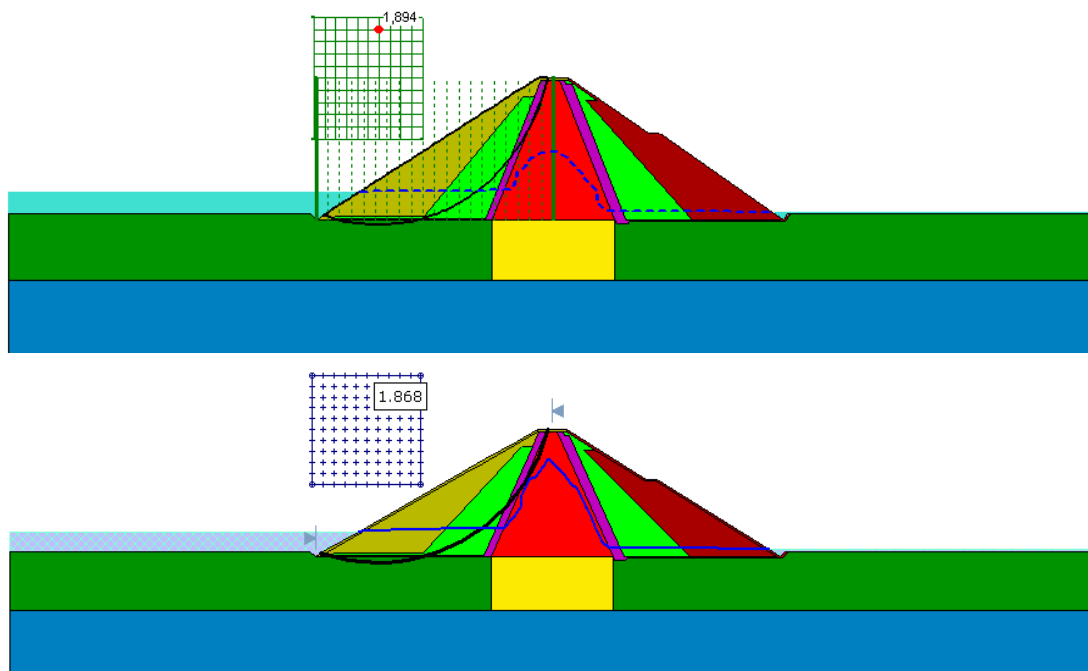


Fig. 6.50 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 30 dias.

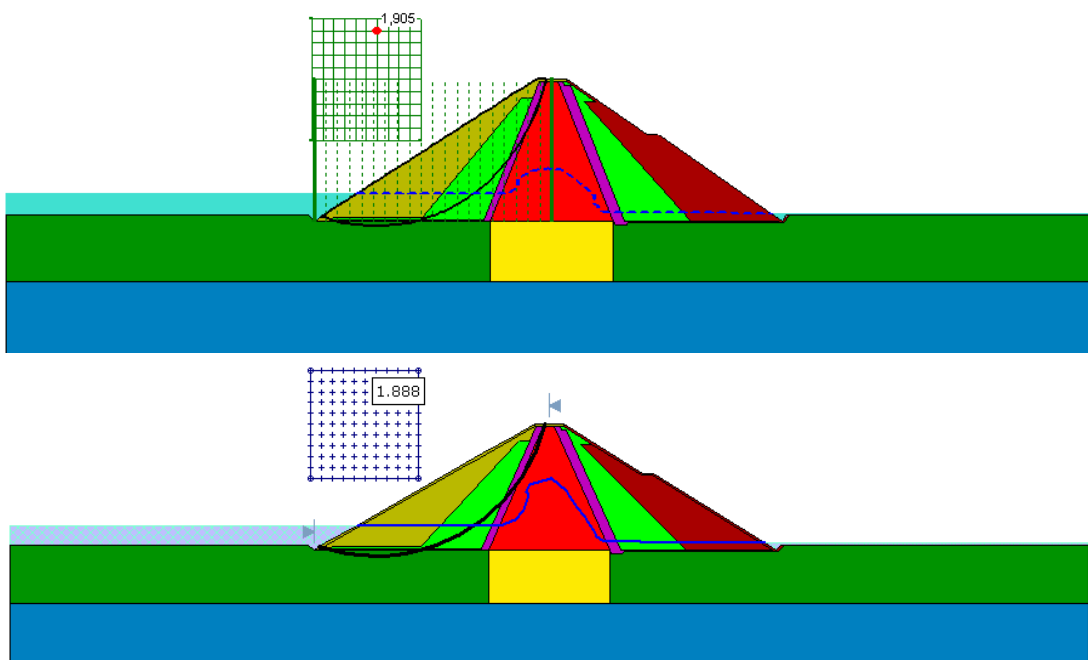


Fig. 6.51 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de montante para 120 dias.

Como se pode verificar os resultados obtidos pelos programas SLOPE/W e SLIDE são bastante próximos, sendo ainda de notar que em todas as fases do esvaziamento o fator de segurança é superior a 1,3, estando em conformidade com o Regulamento de Segurança de Barragens.

### 6.7. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE JUSANTE

São apresentados os resultados obtidos para análise de estabilidade de jusante para os tempos: 0 segundos, 7 dias, 15 dias, 30 dias e 120 dias, constatando-se que não há alteração do fator de segurança ao longo do tempo.

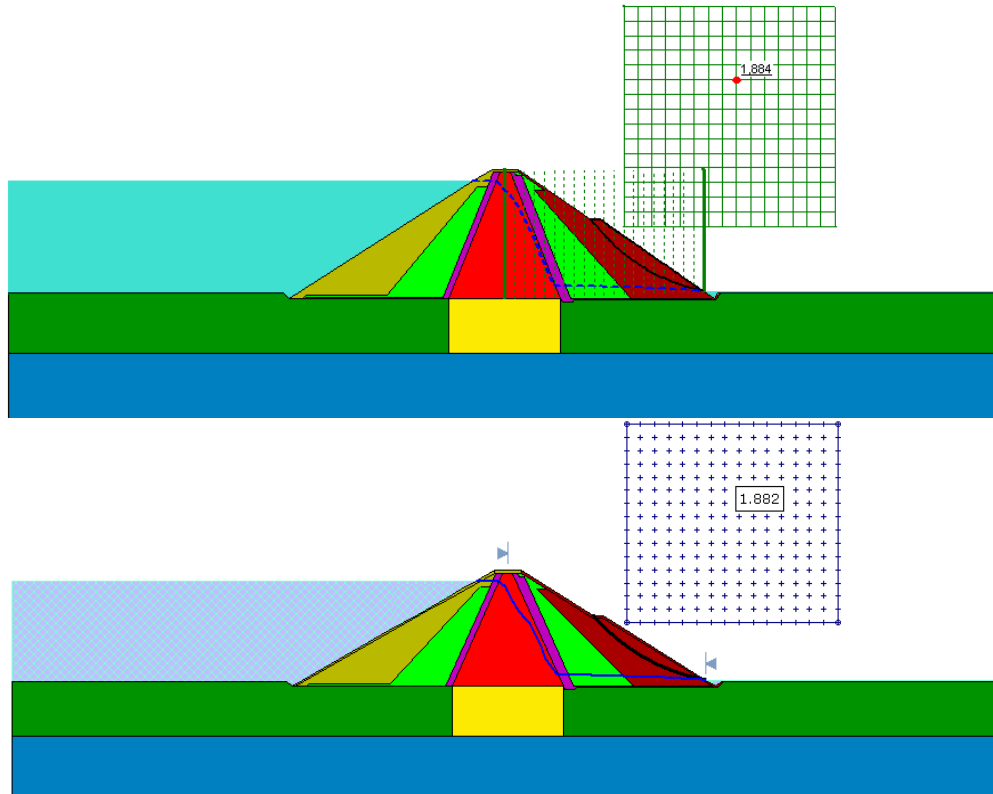


Fig. 6.52 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para o instante inicial.

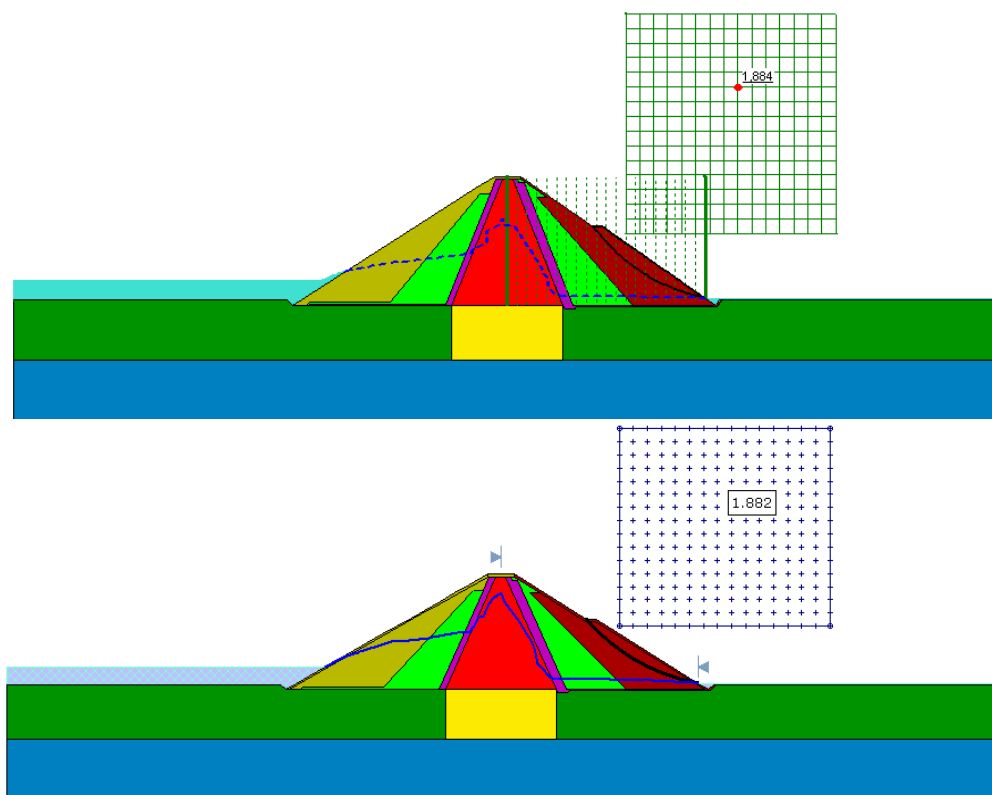


Fig. 6.53 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 7 dias.

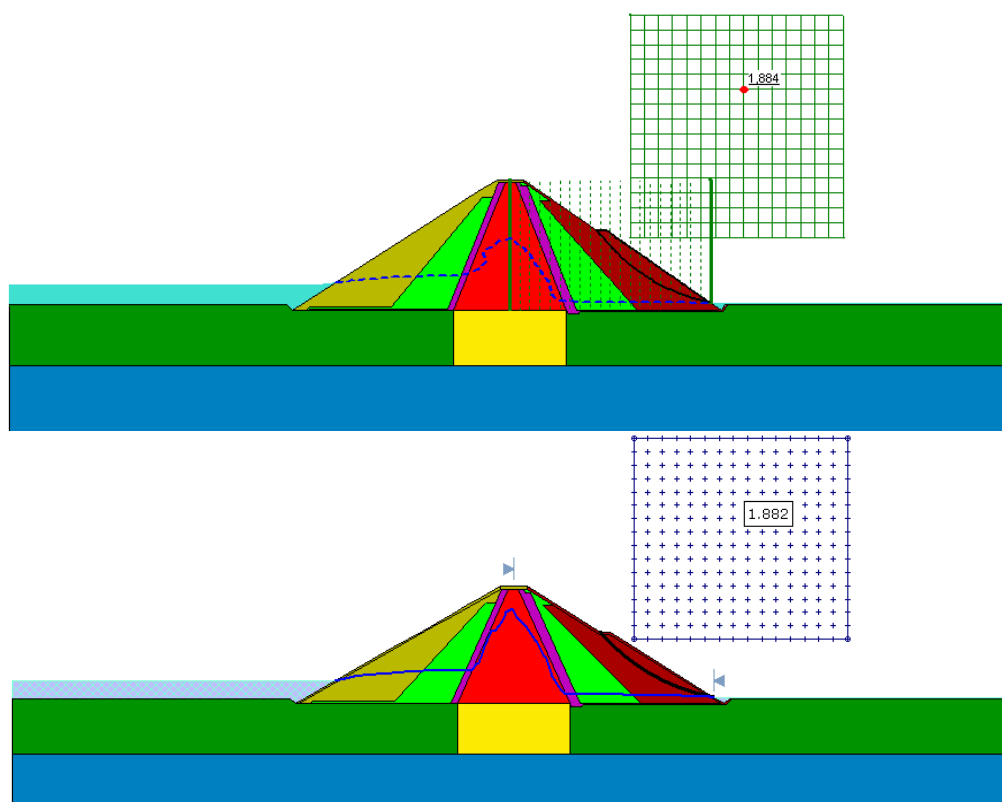


Fig. 6.54 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 15 dias.



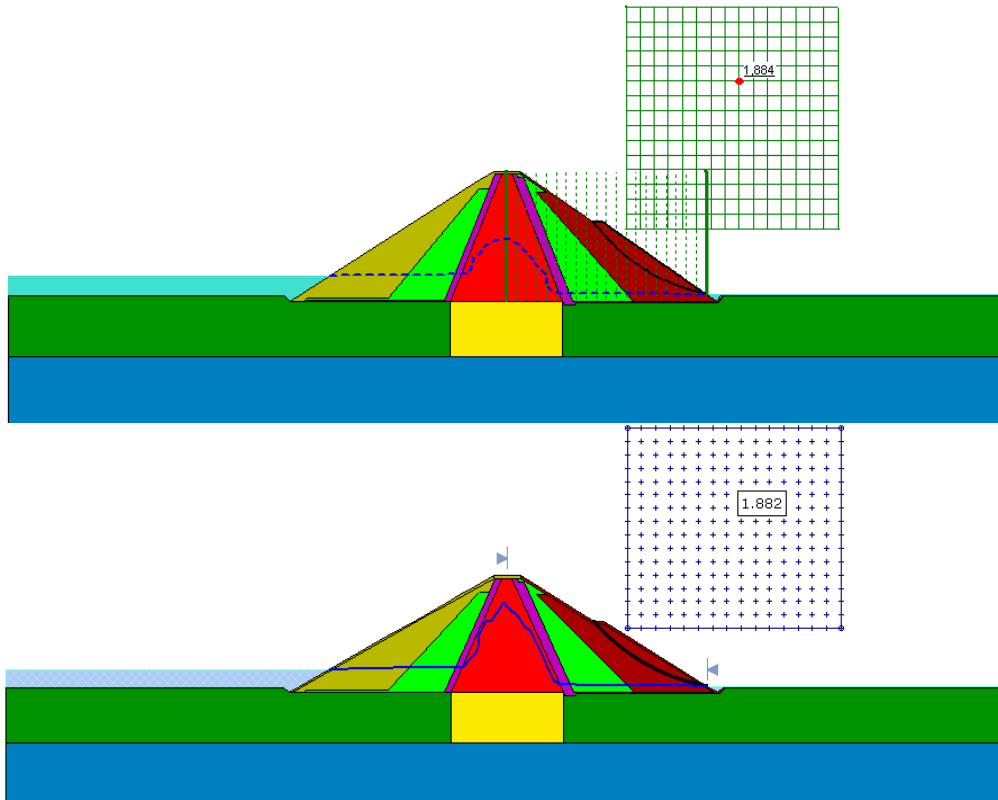


Fig. 6.55 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 30 dias.

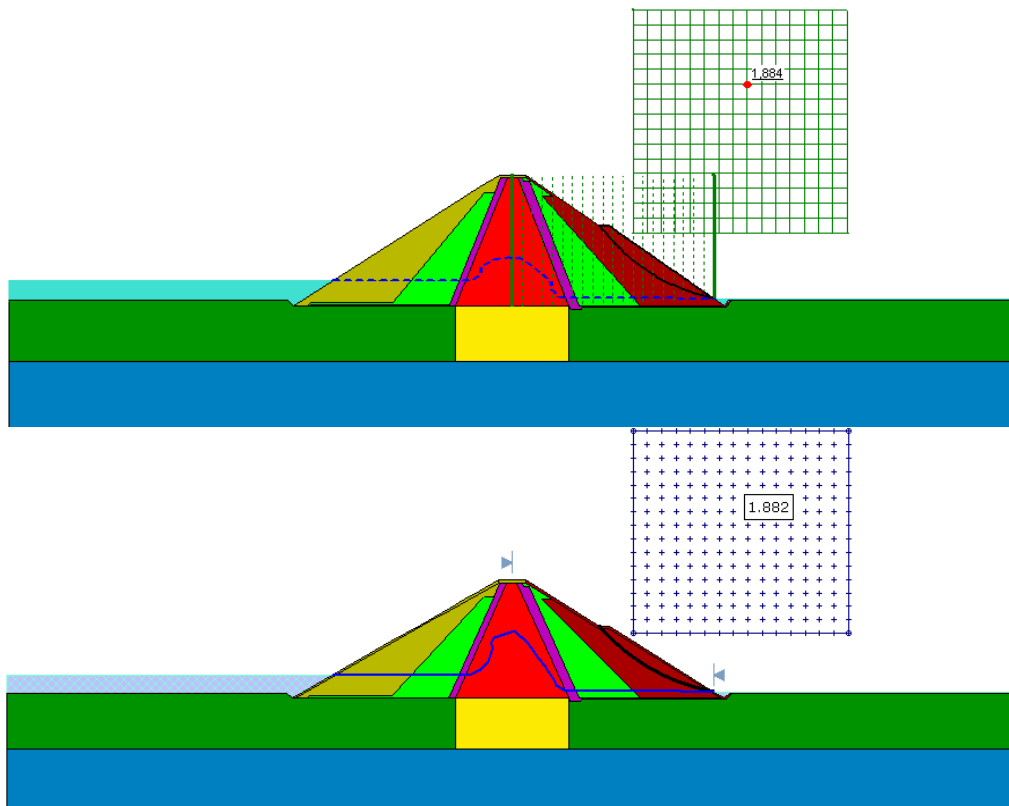


Fig. 6.56 – SLOPE/W e SLIDE - Fator de segurança crítico de jusante para 120 dias.

Como se pode verificar, os resultados obtidos pelo SLOPE/W e SLIDE são novamente bastante próximos. É de notar ainda que em todas as fases do esvaziamento o fator de segurança é superior a 1,3, estando em conformidade com o Regulamento de Segurança de Barragens.

# 7

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo a comparação de análises realizadas em diferentes programas, versando o comportamento hidráulico e a análise de estabilidade de uma barragem de aterro.

Previamente à realização das análises numéricas procedeu-se a uma revisão de conceitos relativos a barragens e à percolação da água nos solos. Alguns destes conceitos foram alvo de estudo nas unidades curriculares de Mecânica dos Solos.

Tendo por base a recolha da informação supracitada, passou-se à fase de modelação numérica da percolação, simulando duas situações: pleno armazenamento e esvaziamento rápido.

A análise do comportamento hidráulico da estrutura decorrente da percolação da água, foi efetuada nos programas SEEP/W e RS2.

Ambos os programas revelaram ser bastante competentes na obtenção de resultados neste tipo de análise. Embora tenham sido obtidos resultados semelhantes nos dois programas, é relevante comentar alguns aspetos positivos e negativos de cada um.

O programa SEEP/W de uma forma geral revelou ser mais intuitivo para o utilizador. A facilidade com que se alteram dados relativos à geometria e às propriedades de materiais é notória. O mesmo não acontece no programa RS2, sendo que neste qualquer alteração a nível de geometria revela-se trabalhoso.

A nível de visualização ambos os programas oferecem sensivelmente as mesmas opções.

Acima de tudo o programa SEEP/W, integrando a lista de programas da GeoStudio, torna mais fácil o processo de modelação de problemas complexos. As informações são partilhadas pelos diversos programas que fazem parte desta lista, dispensando, assim, repetir certas caracterizações (geometria, materiais, condições de fronteira, etc.).

Relativamente à análise de estabilidade, foram comparados os programas SLOPE/W e SLIDE, quer para o pleno armazenamento, quer para a situação de esvaziamento rápido. Desta análise pretendia-se obter

os fatores de segurança críticos e respetivas superfícies de deslizamento ao longo das várias etapas do processo.

Os programas SLOPE/W e SLIDE oferecem praticamente os mesmos métodos de análise, no entanto só foi aplicado o método de Bishop. Quanto à forma como são obtidas as superfícies de escorregamento, o programa SLIDE oferece mais opções; foi escolhida a opção de Grelha e Raios, pois esta constava como opção em ambos. É de referir que o programa SLIDE é mais amigo do utilizador no que toca à caracterização das propriedades mecânicas dos materiais.

Quanto à análise de resultados propriamente dita, o programa SLOPE/W permite de uma forma mais simples obter os resultados desejados. No entanto ao nível de visualização de resultados o SLIDE, permite uma definição mais alargada da informação que se pretende exibir nas imagens.

A principal conclusão desta dissertação é que embora os programas estudados tenham obtidos soluções bastante semelhantes, os programas da Geo Studio são mais apropriados quando se pretende fazer vários tipos de análise para o mesmo modelo, pela questão já referida de a informação ser partilhada através de um esquema em árvore.

## **7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

A necessidade de cumprir os curtos prazos nos quais se desenvolve uma dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil obriga a que algumas questões, de análise ou compreensão mais complexas, sejam tratadas de forma menos profunda.

Neste subcapítulo são abordadas possíveis temáticas para continuar a reflexão.

O trabalho realizou-se numa análise através do SEEP/W e RS2. Caso se pretenda completar estas análises de forma mais detalhada, poderá ser usado o programa SIGMA/W, considerando nesse caso tensões efetivas.

A abordagem a um regime estacionário e transitório, estudando o pleno armazenamento e esvaziamento da barragem, poderá futuramente ser realizada em programas como o MEF da GEO5, SVFLUX da SoilVision, VERSAT-S2D da Wutec Geotechnical International. Existem inúmeros outros programas que permitem este tipo de análise e cuja utilização permitiria alargar a abordagem comparativa aqui apresentada.

Relativamente à análise de estabilidade, foram feitas as comparações de modelação e de resultados nos programas SLOPE/W e SLIDE. Para desenvolvimento futuro propõe-se a realização do mesmo tipo de análise em programas como GeoStructural Analysis da Bentley Systems, Inc, CLARA-W da Hungr Geotechnical Research, Inc, PLAXIS 2D desenvolvido pela Plaxis bv e SVSLOPE da SoilVision. Estes são alguns dos programas existentes no mercado para análise de estabilidade de taludes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ([http://www.icold-cigb.net/GB/dams/technology\\_of\\_dams.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/dams/technology_of_dams.asp)) 08/01/2017
- [2] Quintas, F. *Planeamento da Construção de Barragens de Terra*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2002.
- [3] Vallejo, S. *Hydraulic Engineering Failure of Large Dams*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2016.
- [4] ([http://www.asceville.org/cw\\_dams\\_explore.html](http://www.asceville.org/cw_dams_explore.html)) 08/01/2017
- [5] ([http://www.cm-vilaflor.pt/frontoffice/pages/611?poi\\_id=157](http://www.cm-vilaflor.pt/frontoffice/pages/611?poi_id=157)) 08/01/2017
- [6] (<http://www.civileblog.com/types-of-dams/>) 08/01/2017
- [7] (<http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2015/08/barragem-de-sao-domingos.html>) 08/01/2017
- [8] ([http://www.cm-peniche.pt/CustomPages/SMAS\\_ObraBarragem](http://www.cm-peniche.pt/CustomPages/SMAS_ObraBarragem)).08/01/2017
- [9] Unas, M. *Estudo Experimental e Numérico de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.
- [10] Pinho, A. *Estruturas de Retenção de Água sobre Fundos Móveis. Análises do comportamento Hidráulico da Fundação com Base em Modelações 2D e 3D*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2016.
- [11] Kashef, A. *Groundwater Engineering*, McGraw-Hill, Inc, 1987.
- [12] Caputo, H. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Livros Técnicos e Científicos, 1975.
- [13] Das, Braja M., *Advanced Soil Mechanics, Third Edition*. Taylor & Francis, London, New York, 2008.
- [14] Matos Fernandes, M. *Mecânica dos Solos – Conceitos e Princípios Fundamentais*. FEUP, Porto, 2006.
- [15] Venkatramaiah, C. *Geotechnical Engineering*, Revised Third Edition. New Age International Publishers, New Delhi, 2006.
- [16] (<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAUwcAK/perda-carga>).08/01/2017
- [17] Das, Braja M., *Principles of Geotechnical Engineering, 7th Edition*. Cengage Learning, 2010.



## ANEXO I

### A1.1. CURVAS DE CONDUTIVIDADE E CURVAS DE RETENÇÃO

Neste Anexo são apresentadas nas Figs. A1.1 a A1.7 as curvas de condutividade e de retenção dos vários materiais que constituem o modelo da barragem de aterro utilizado.

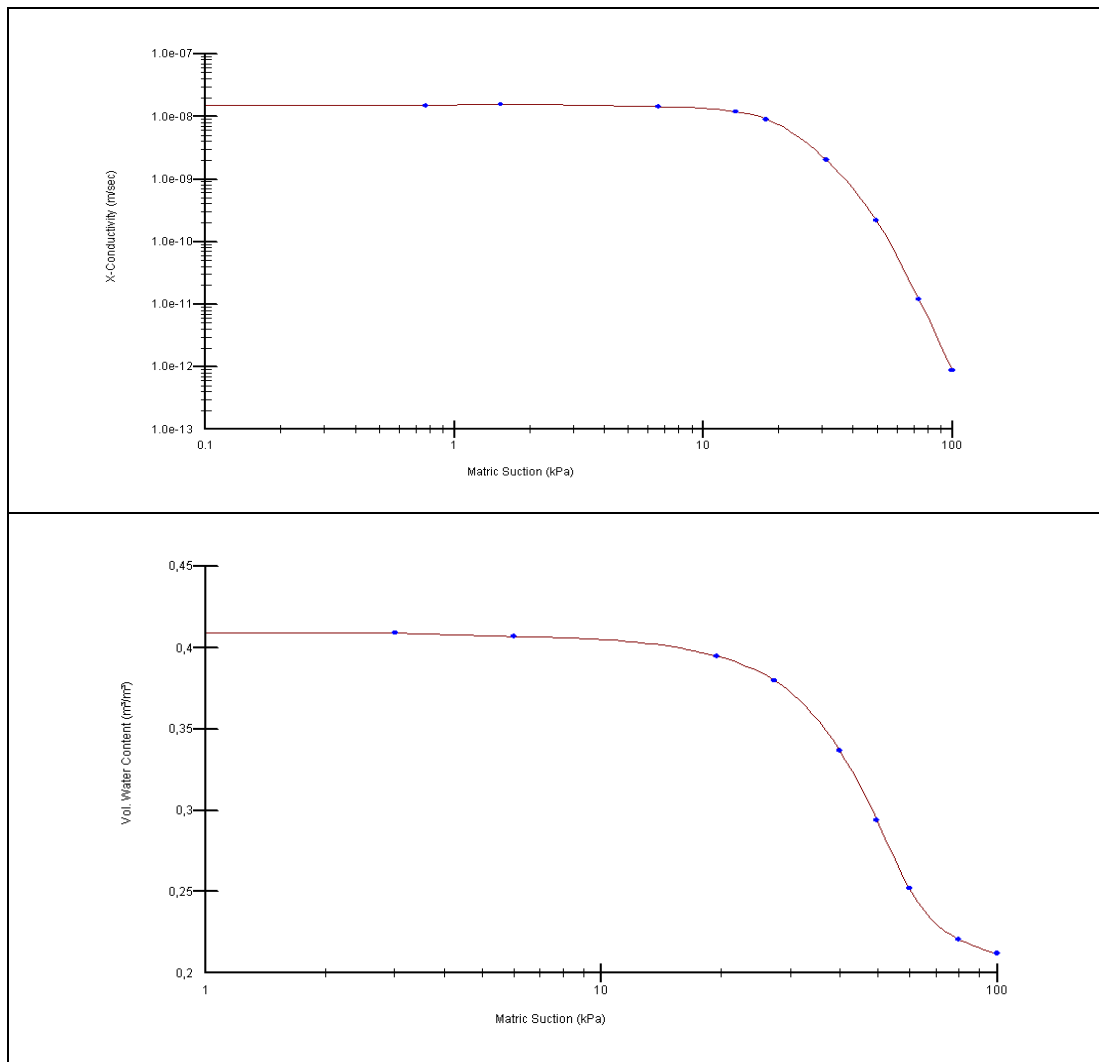


Fig. A.1.1 – Curvas características do Núcleo.

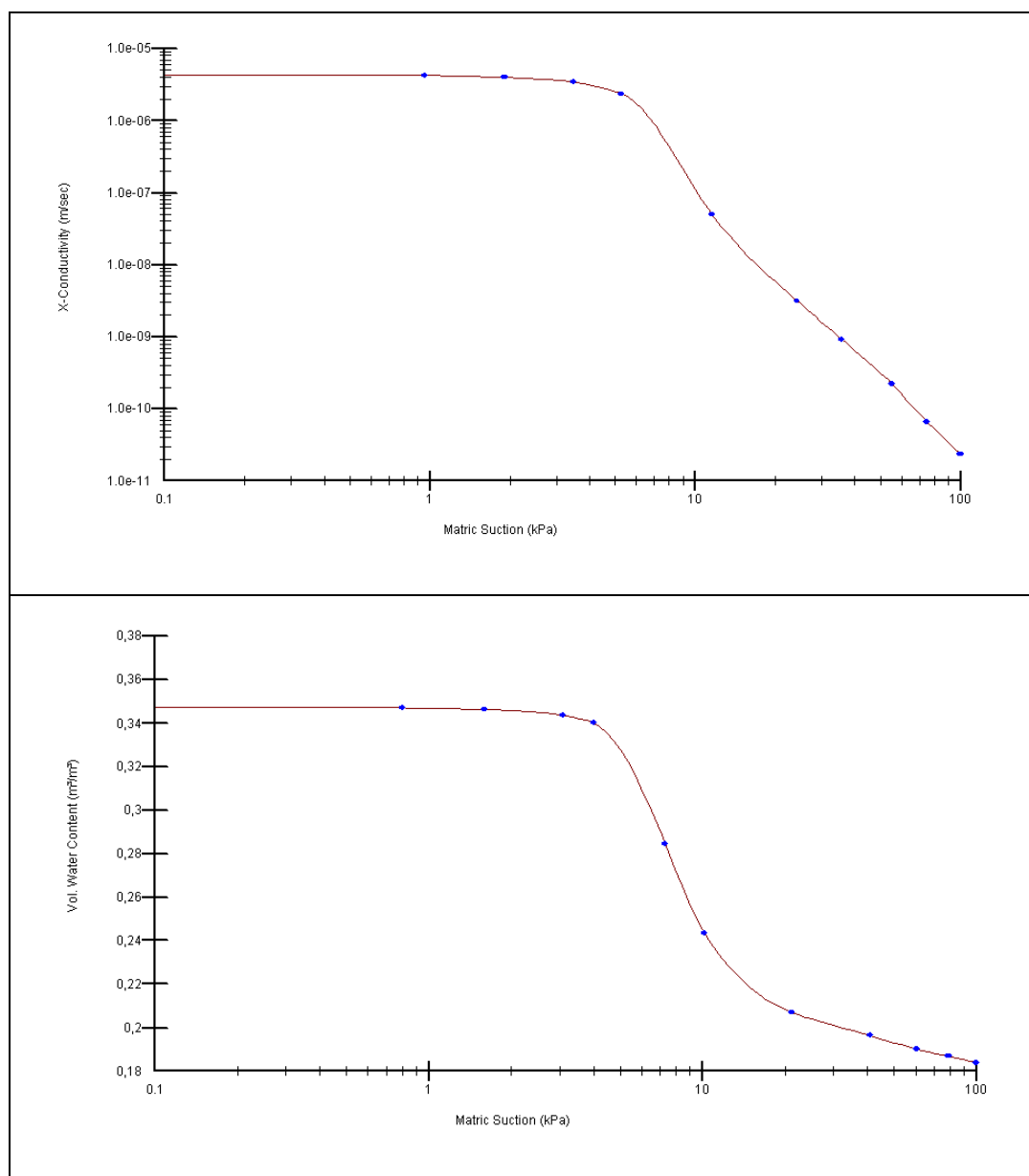


Fig. A.1.2 – Curvas características do Filtro.



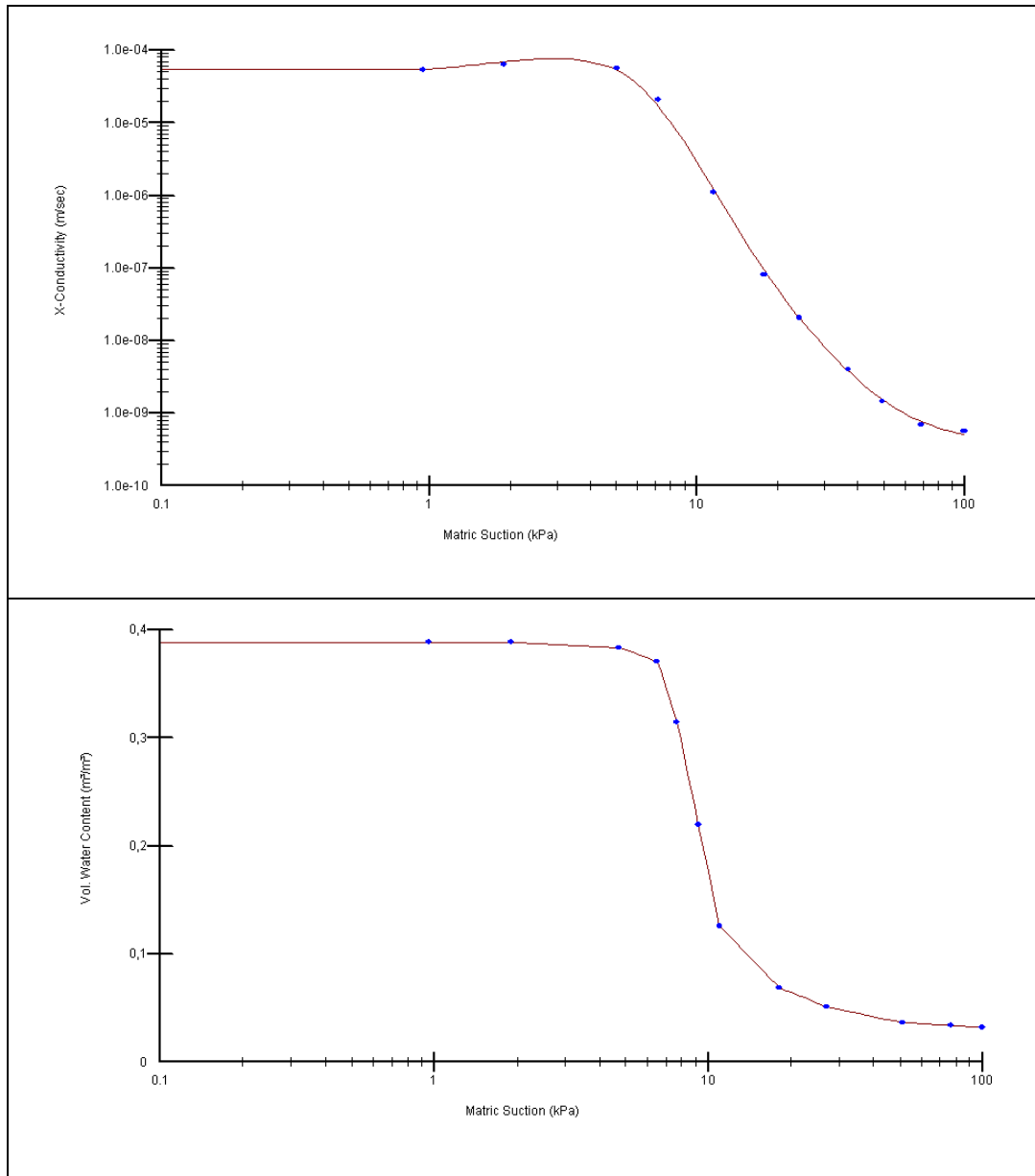


Fig. A.1.3 – Curvas características do Enrocamento de Montante e Jusante.

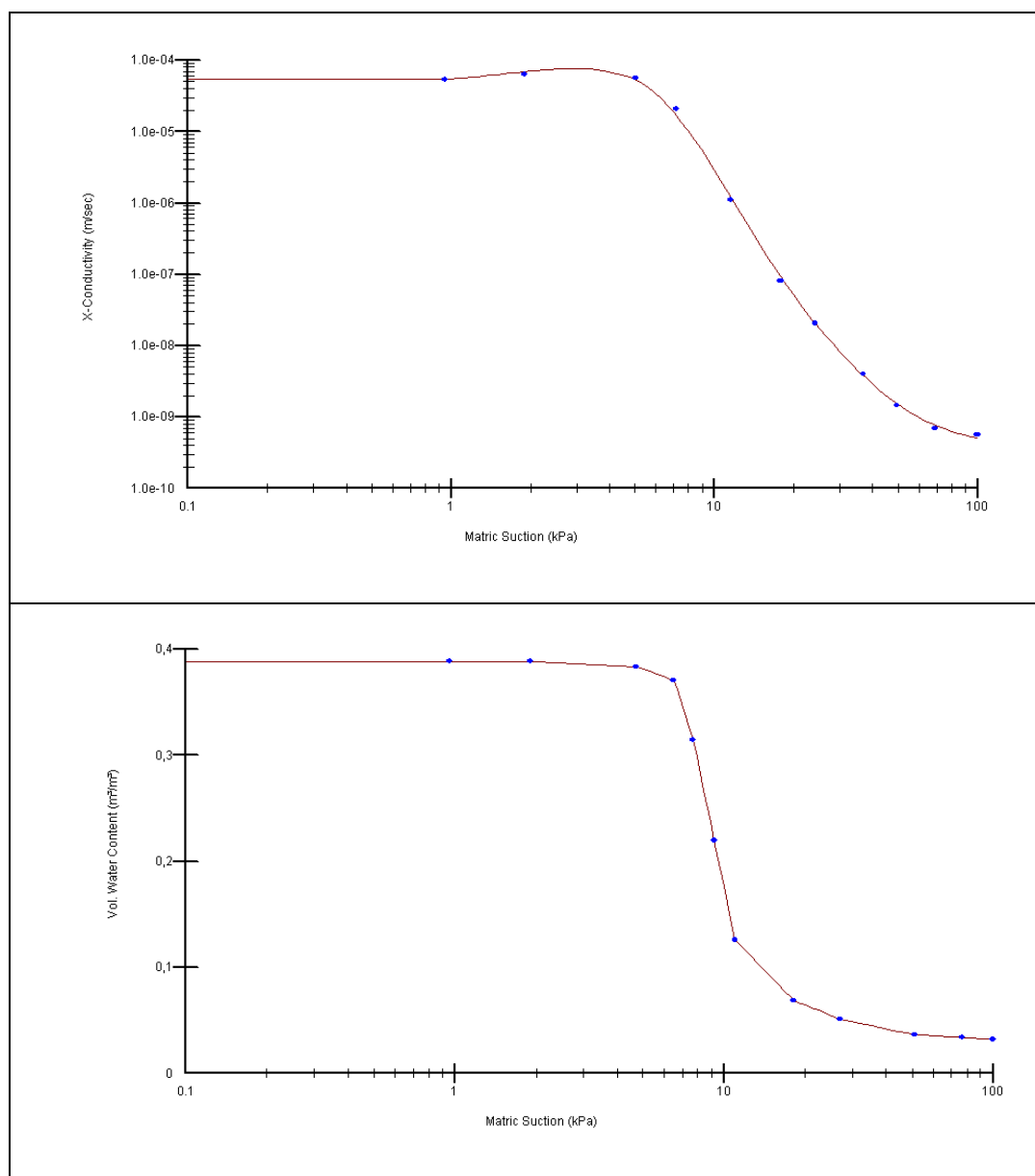


Fig. A.1.4 – Curvas características do Enrocamento de Transição.

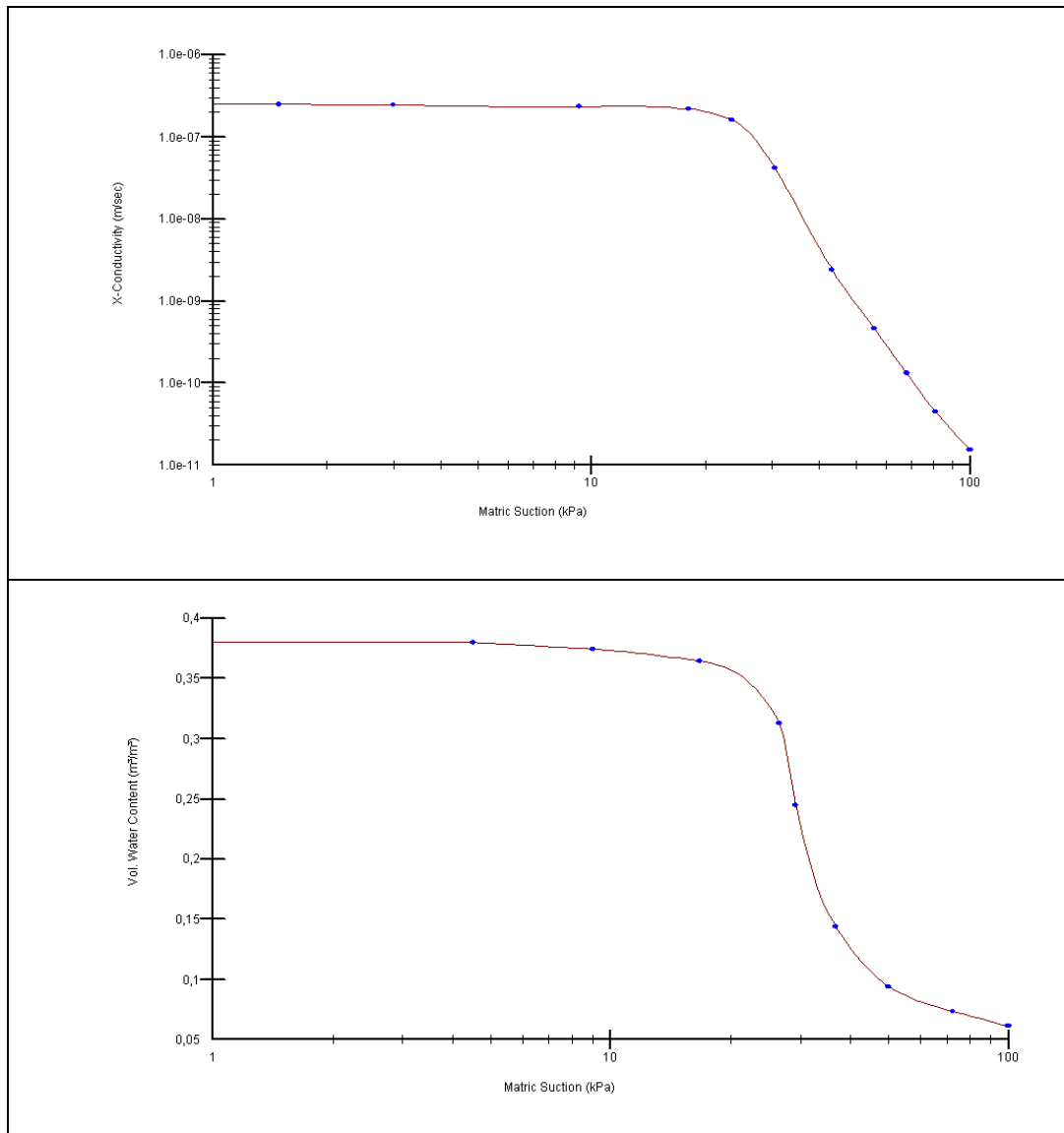


Fig. A.1.5 – Curvas características da Fundação Tratada.

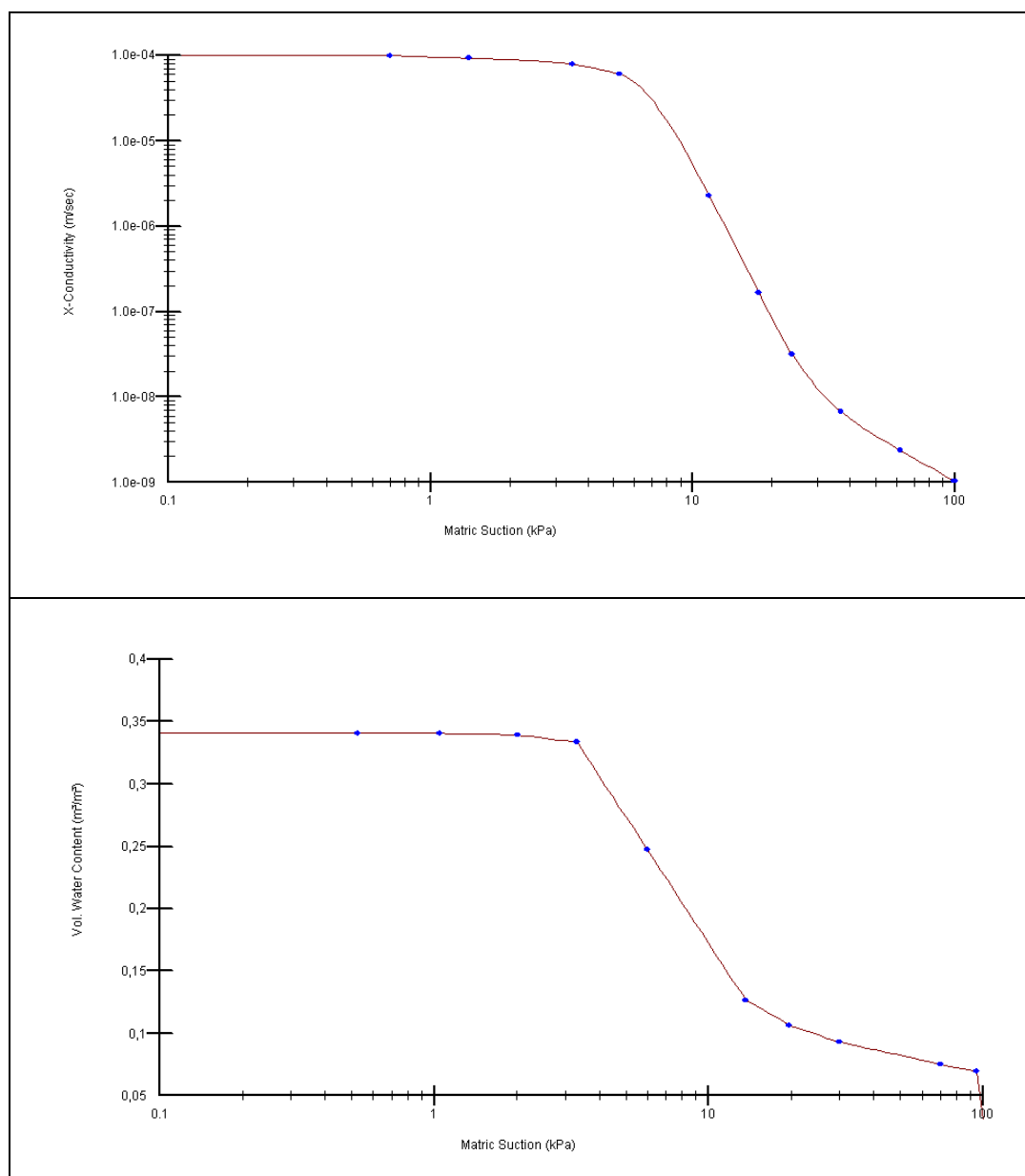


Fig. A.1.6 – Curvas características da Fundação 2.

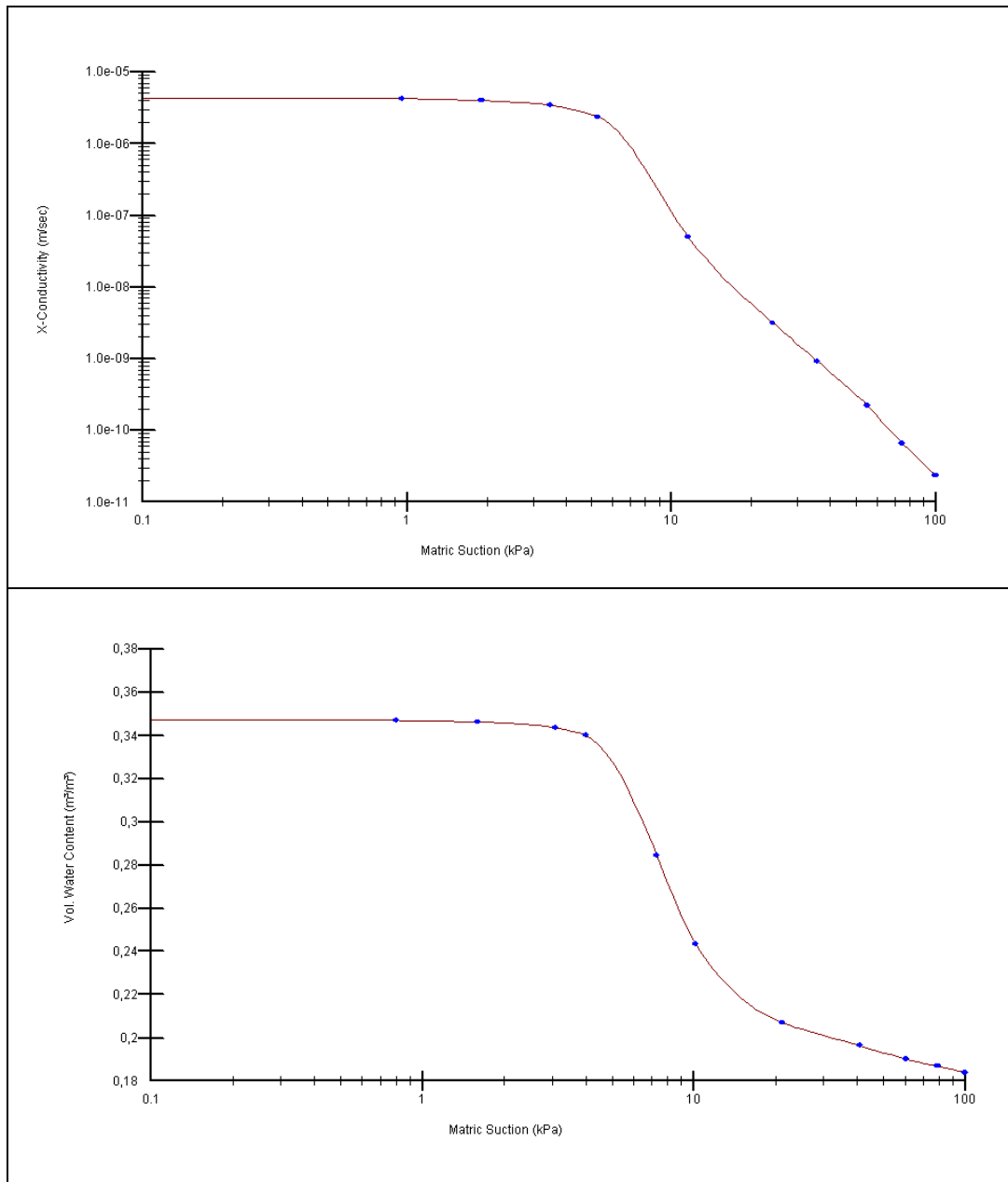


Fig. A.1.7 – Curvas características da Fundação 3.



## ANEXO II

### A2.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO, SITUAÇÃO DE Esvaziamento Rápido

No presente anexo são apresentados os resultados relativos às análises do comportamento hidráulico do modelo, na situação de esvaziamento rápido, realizadas no SEEP/W e no RS2. As Figs. A.2.1 a A.2.7 descrevem de forma sequencial a evolução da carga hidráulica, segundo o programa SEEP/W.

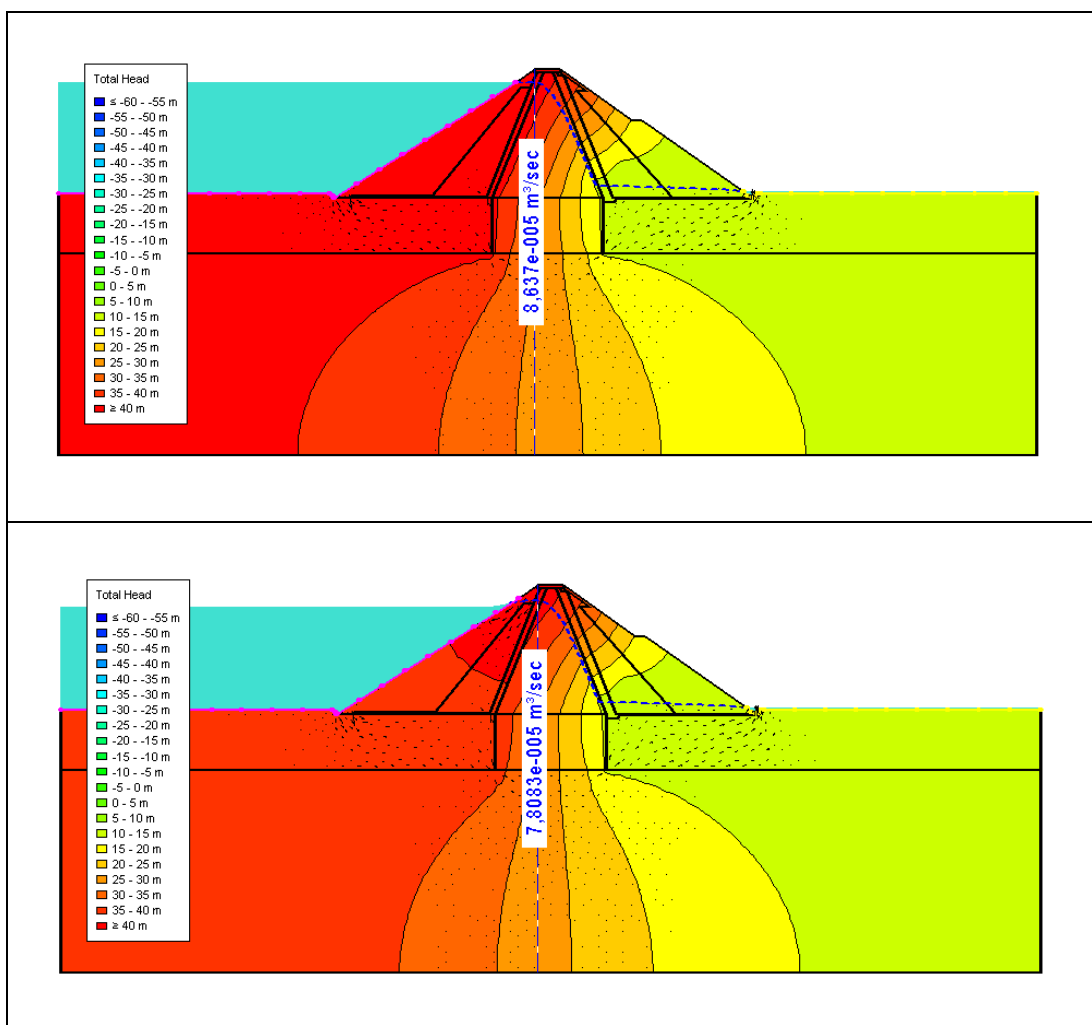


Fig. A.2.1 – SEEP/W - Carga hidráulica para o tempo inicial e 6 horas.

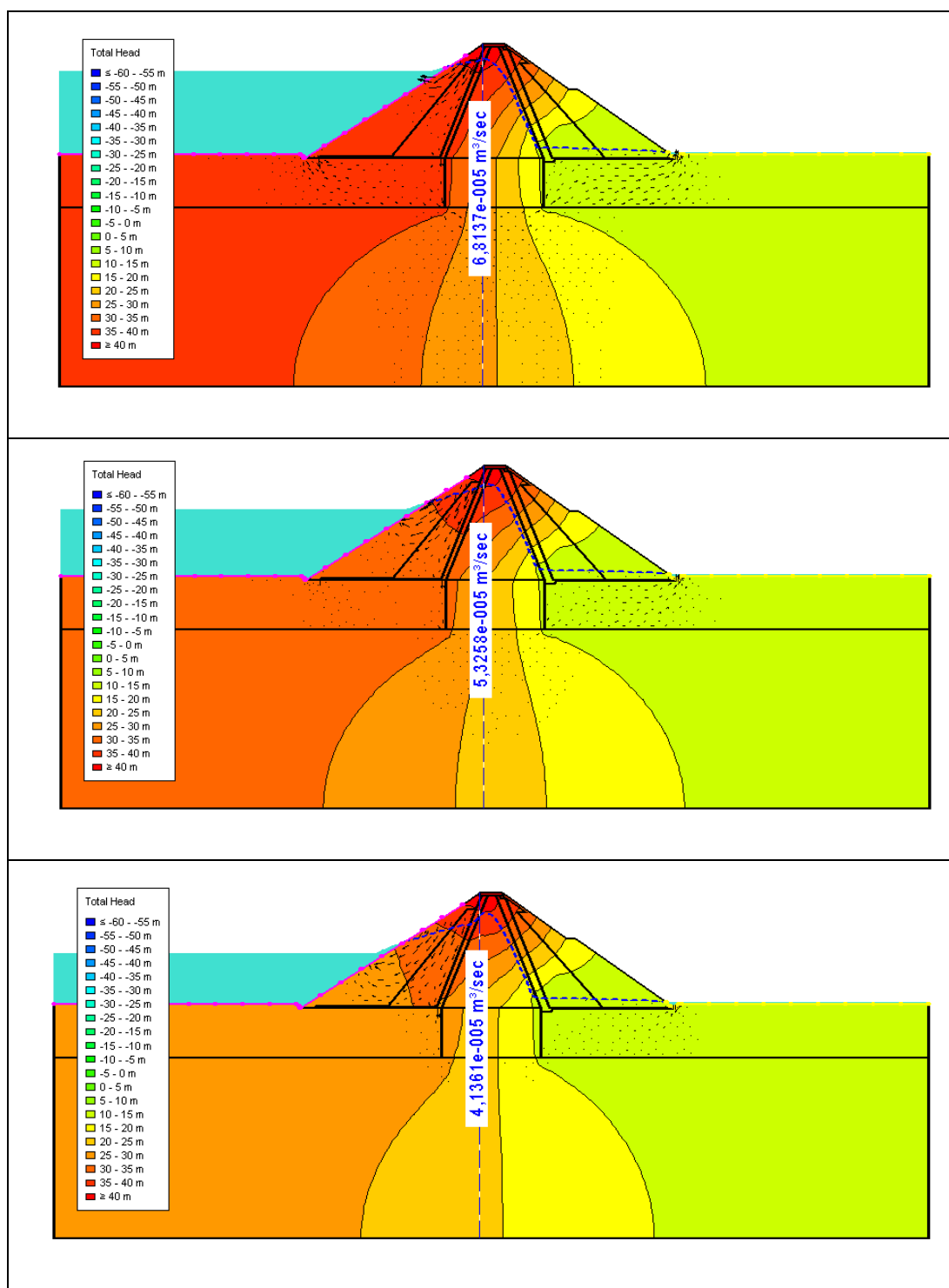


Fig. A.2.2 – SEEP/W - Carga hidráulica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.



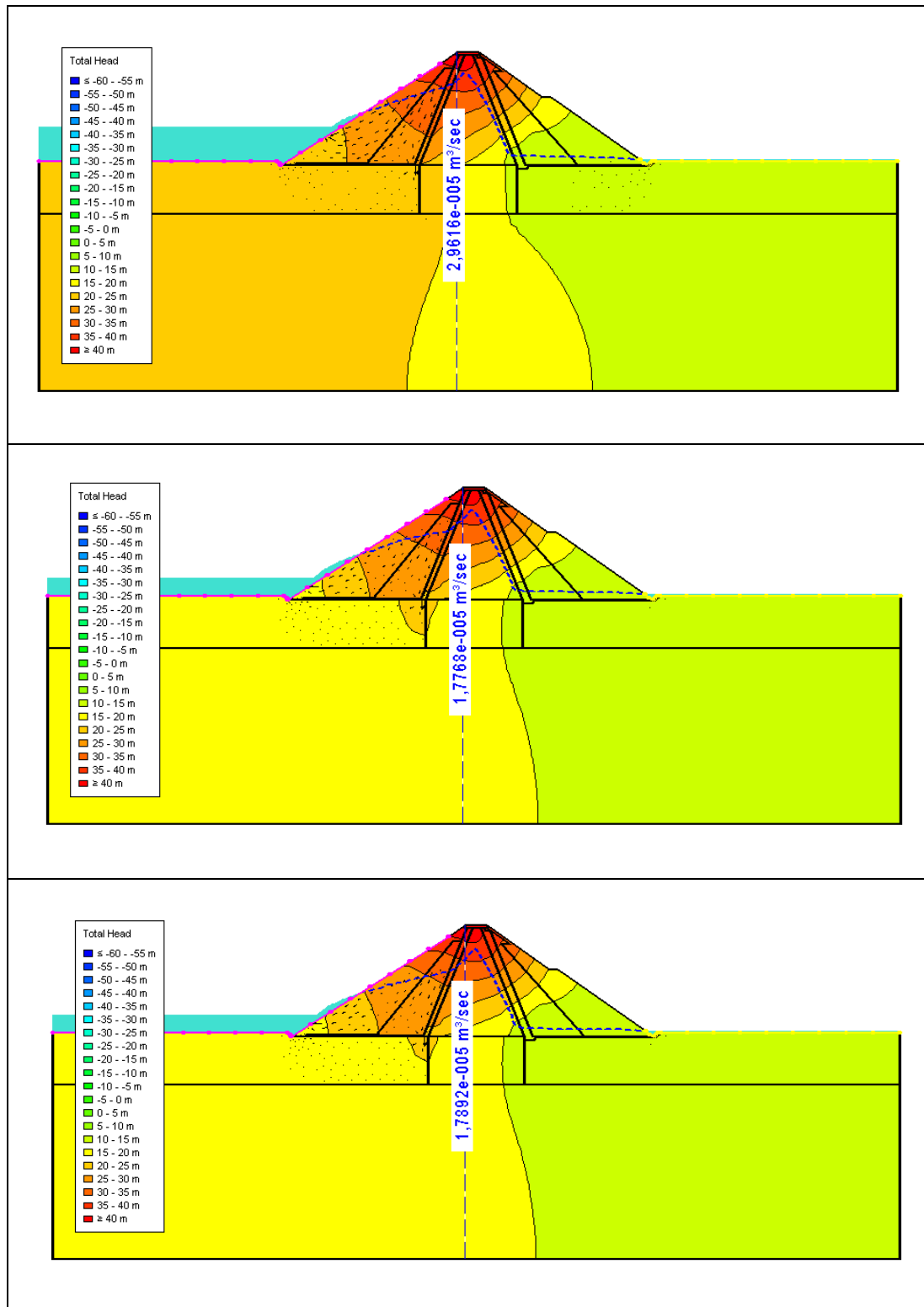


Fig. A.2.3 – SEEP/W - Carga hidráulica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

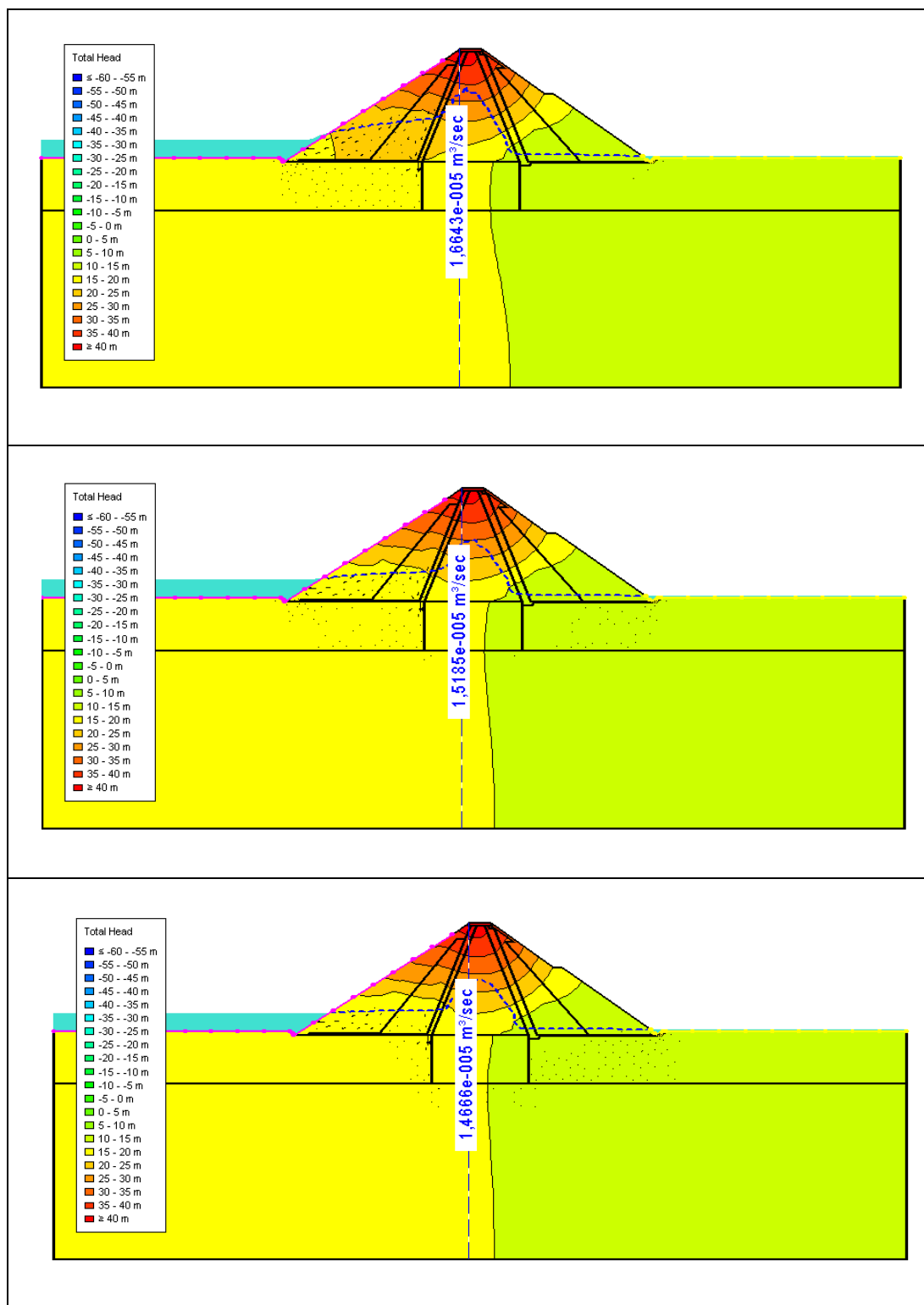


Fig. A.2.4 – SEEP/W - Carga hidráulica para 7 dias, 15 dias e 21 dias.

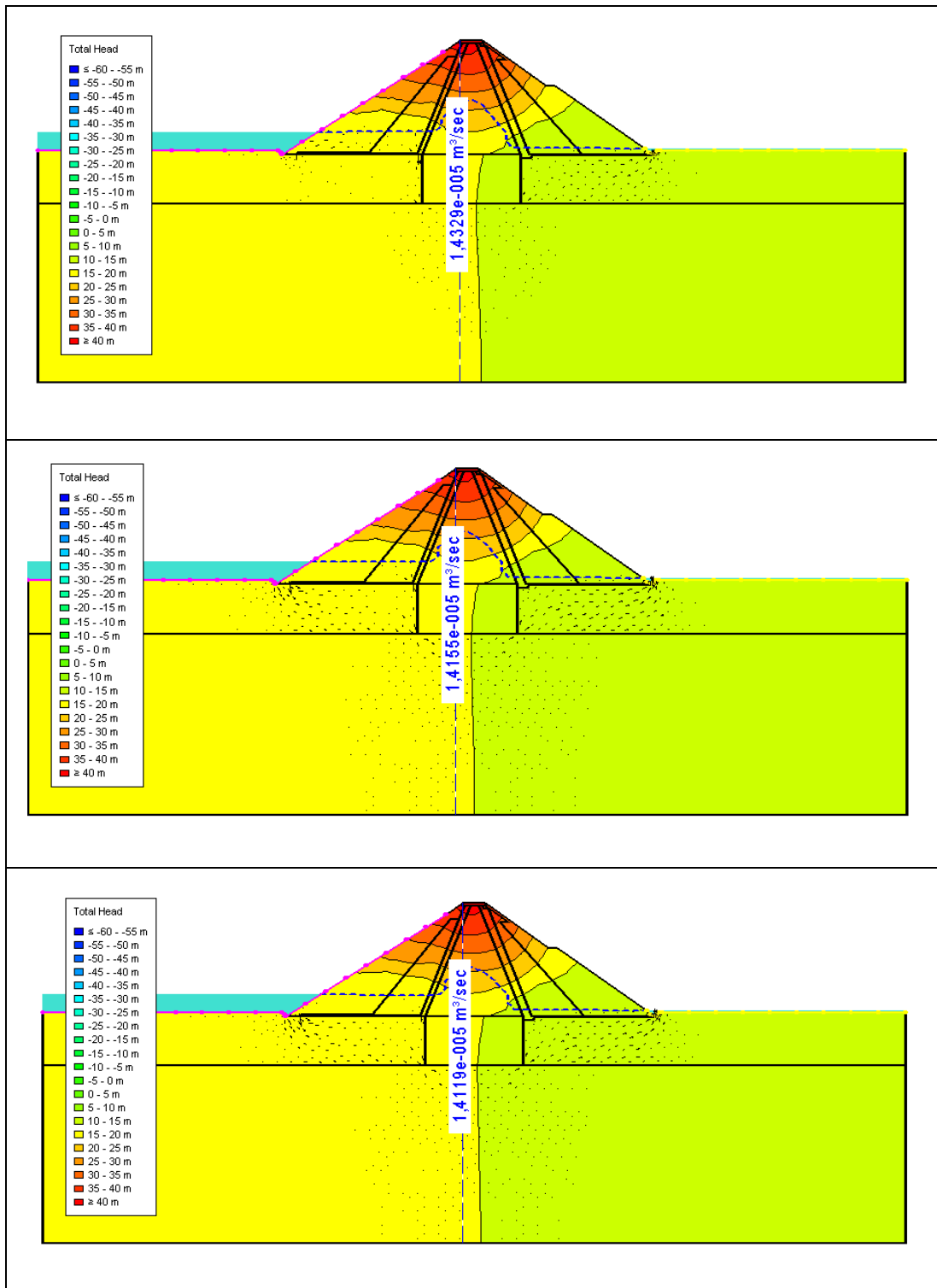


Fig. A.2.5 – SEEP/W - Carga hidráulica para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

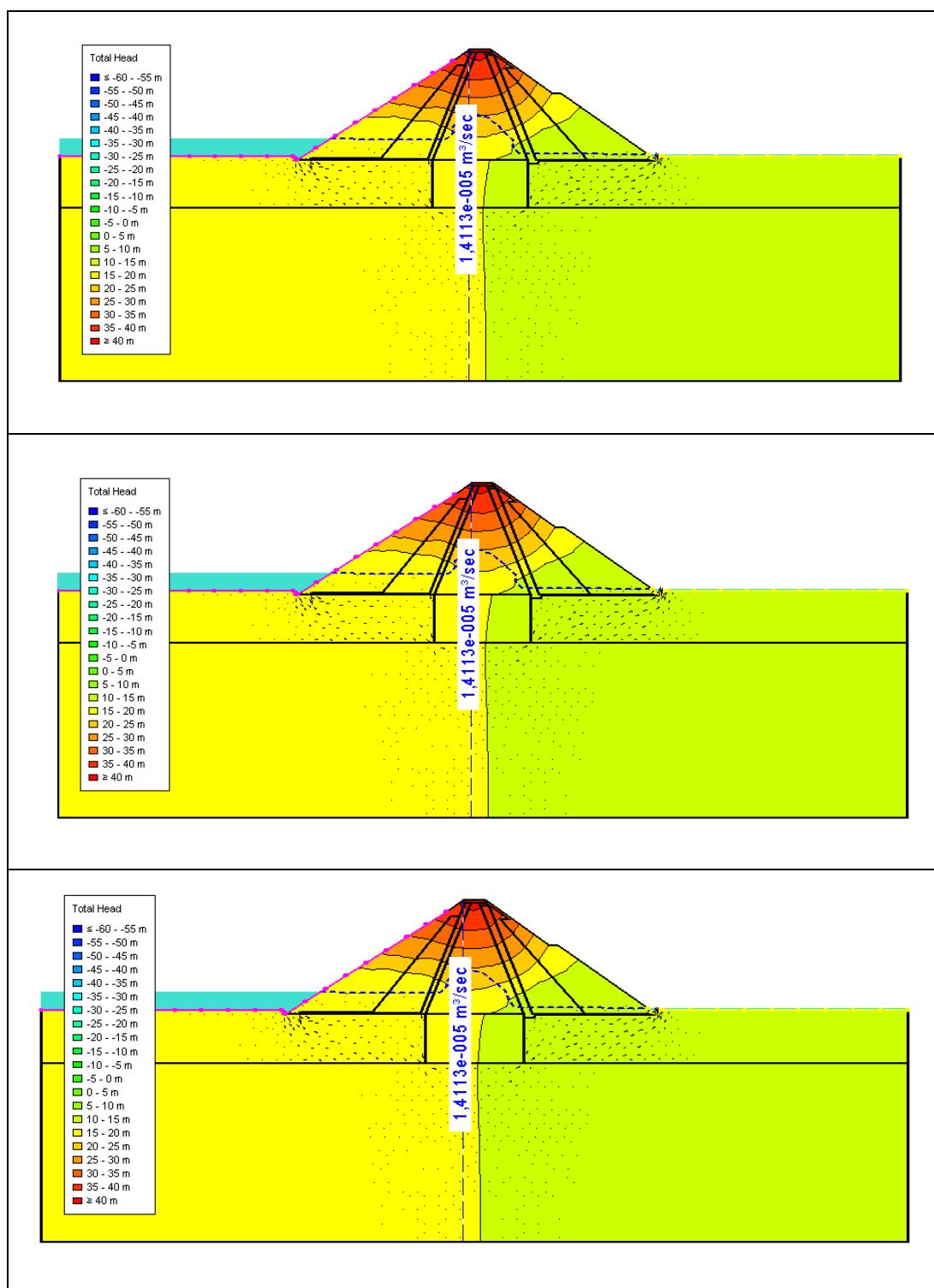


Fig. A.2.6 – SEEP/W - Carga hidráulica para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

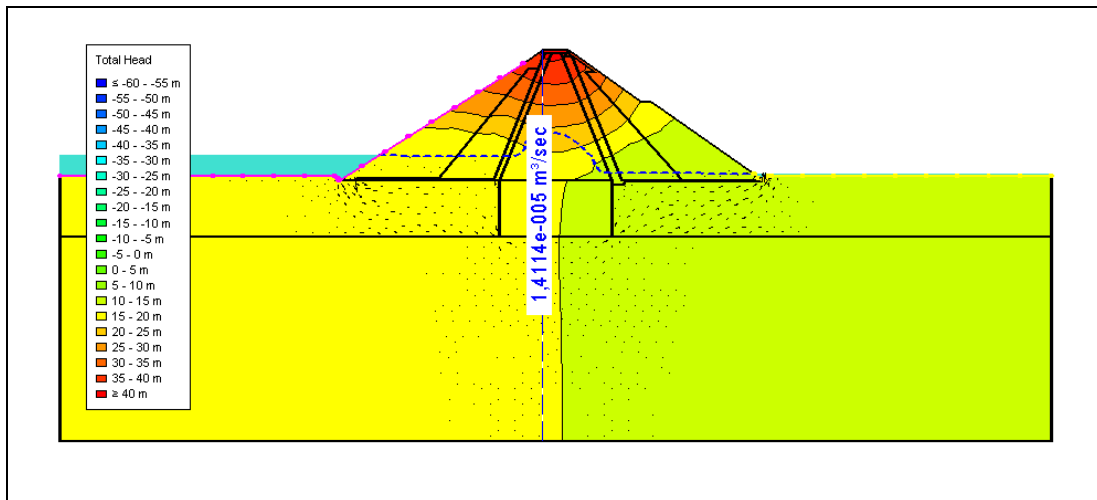


Fig. A.2.7 – SEEP/W - Carga hidráulica para 120 dias.

São agora apresentados nas Figs. A.2.8 a A.2.14 os resultados obtidos pelo programa RS2 para a evolução de forma sequencial da carga hidráulica.

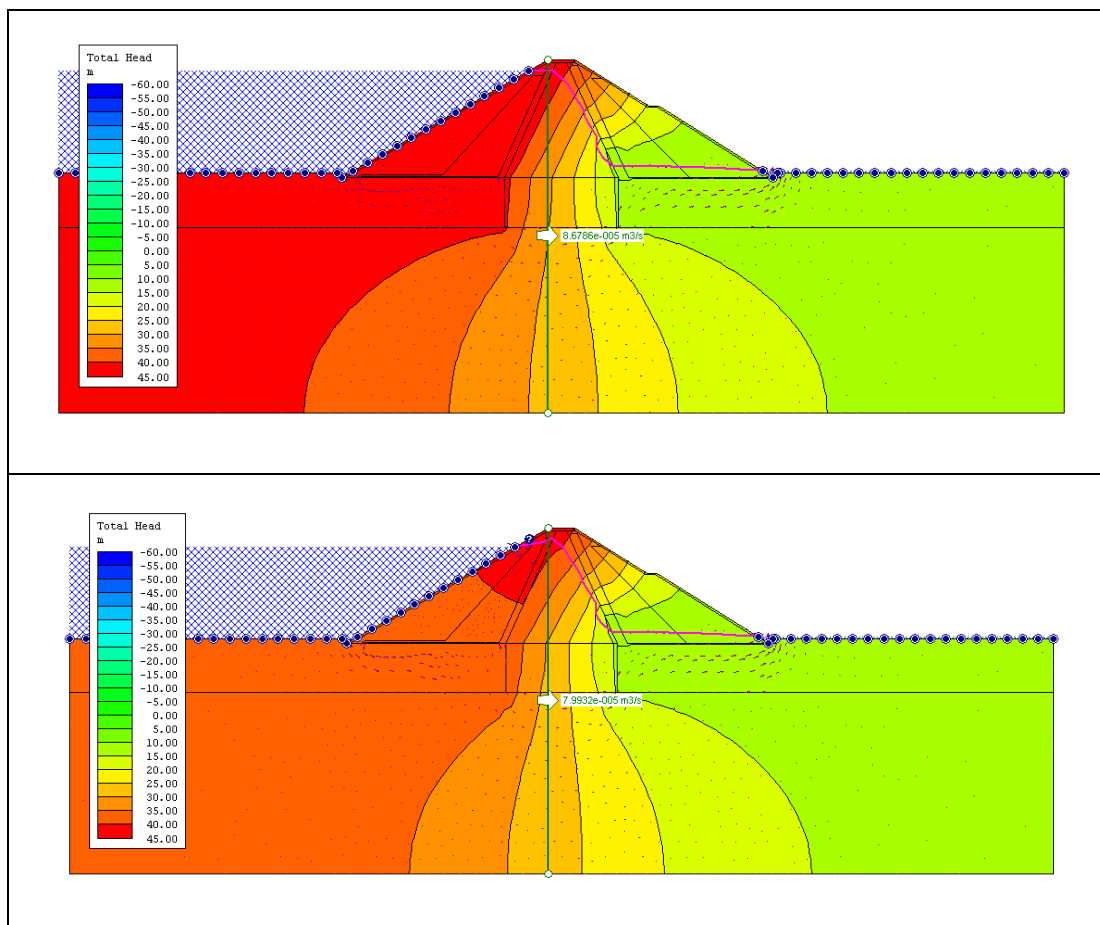


Fig. A.2.8 – RS2 - Carga hidráulica para o tempo inicial e 6 horas.

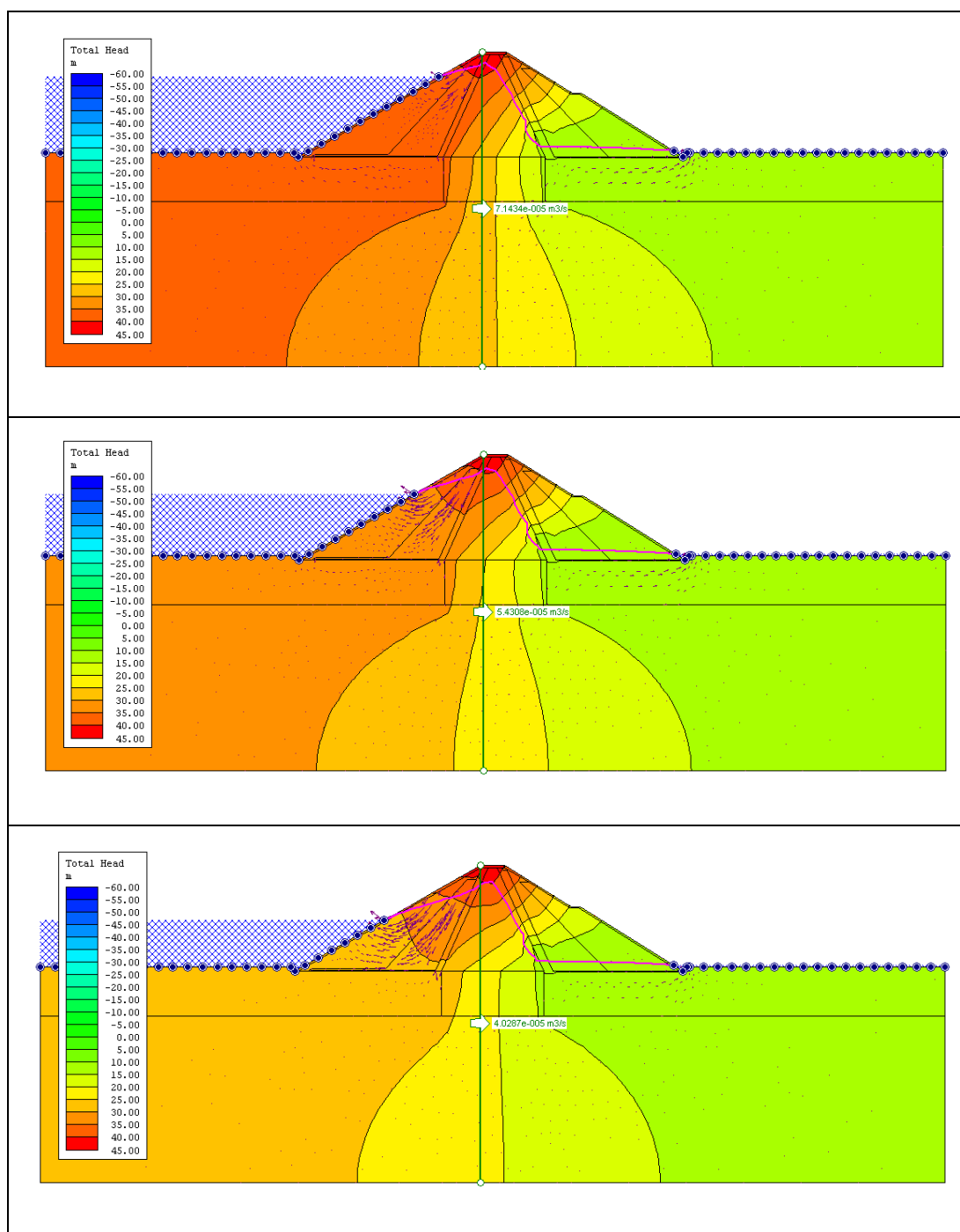


Fig. A.2.9 – RS2 - Carga hidráulica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

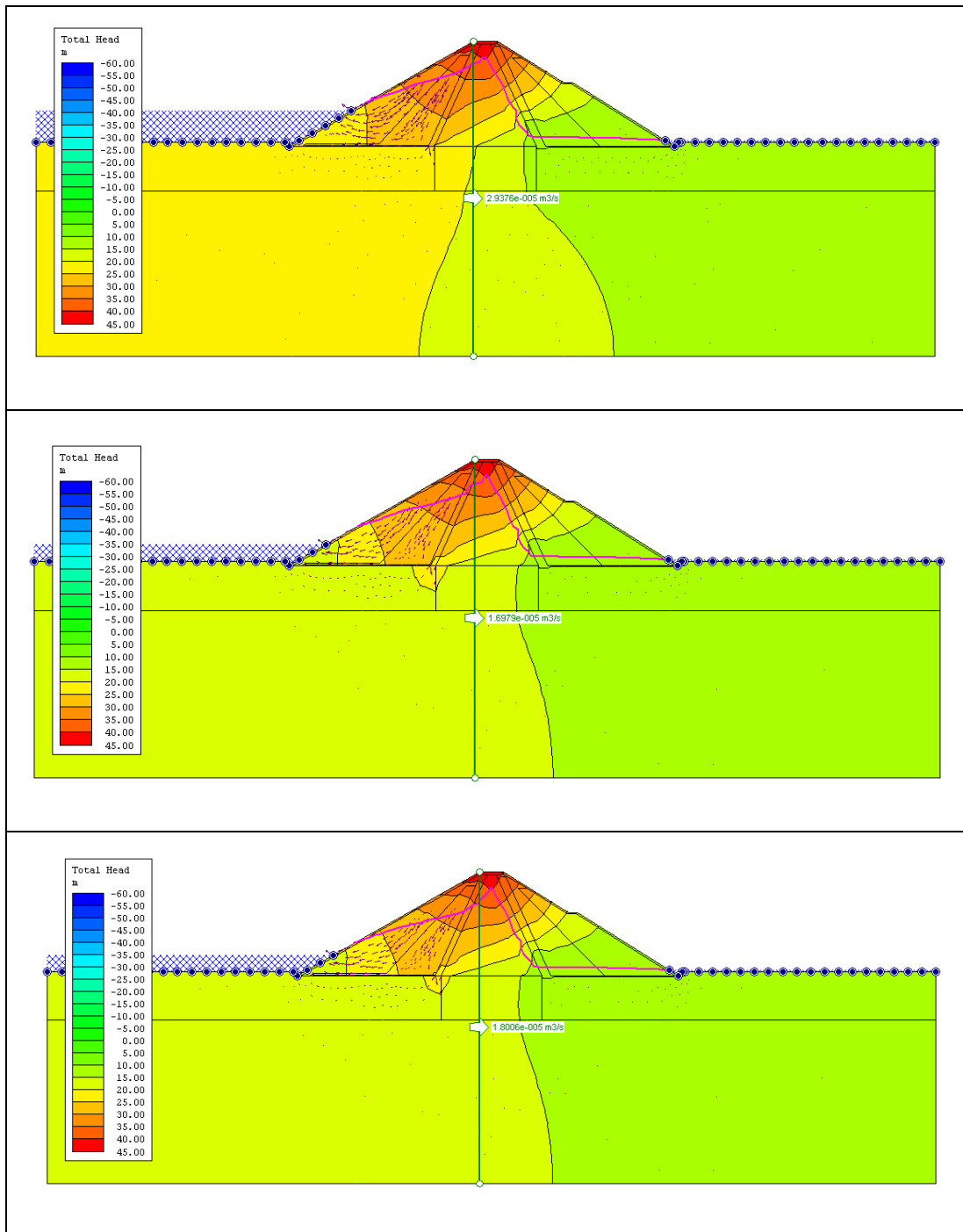


Fig. A.2.10 – RS2 - Carga hidráulica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

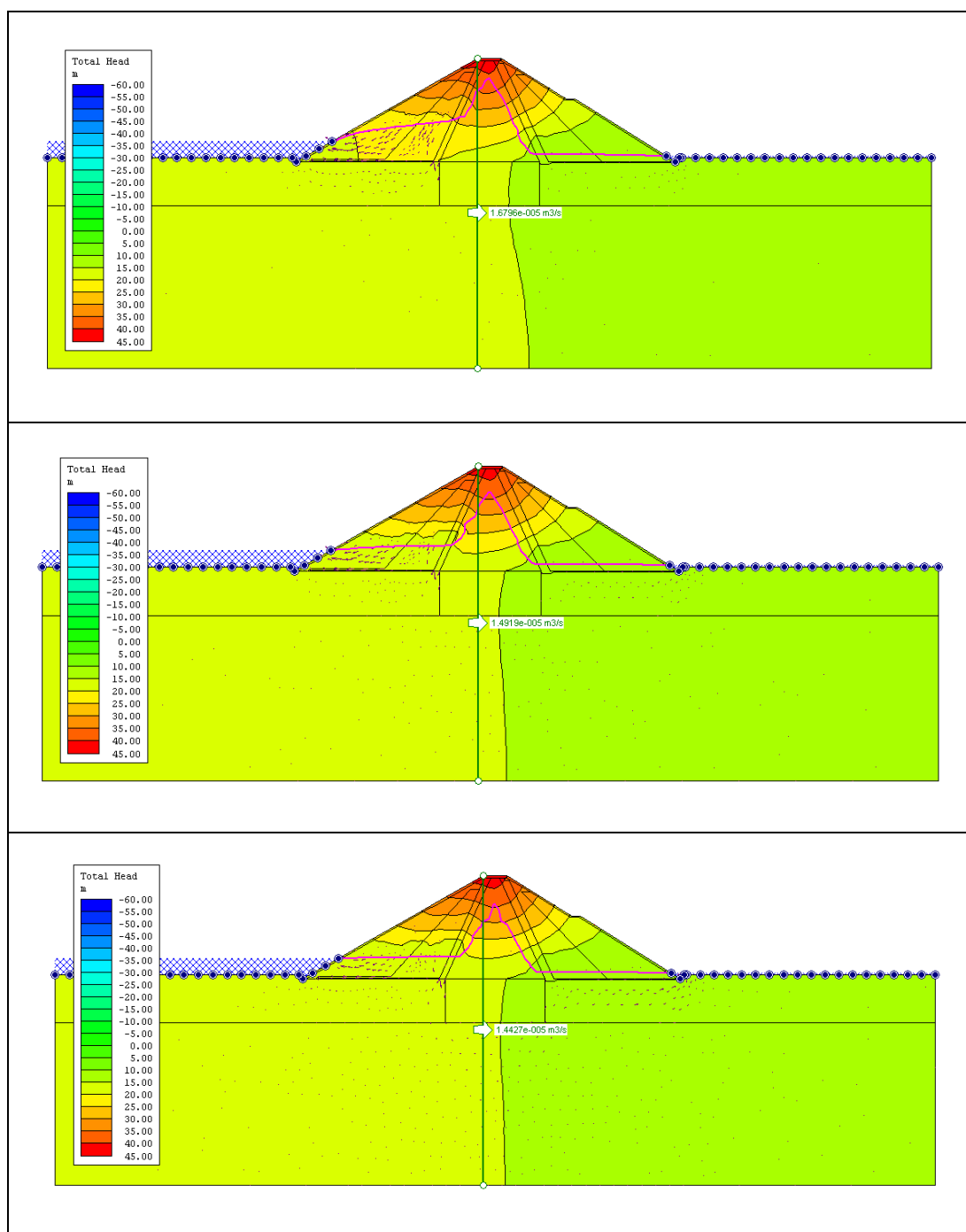


Fig. A.2.11 – RS2 - Carga hidráulica para 7 dias, 15 dias e 21 dias.



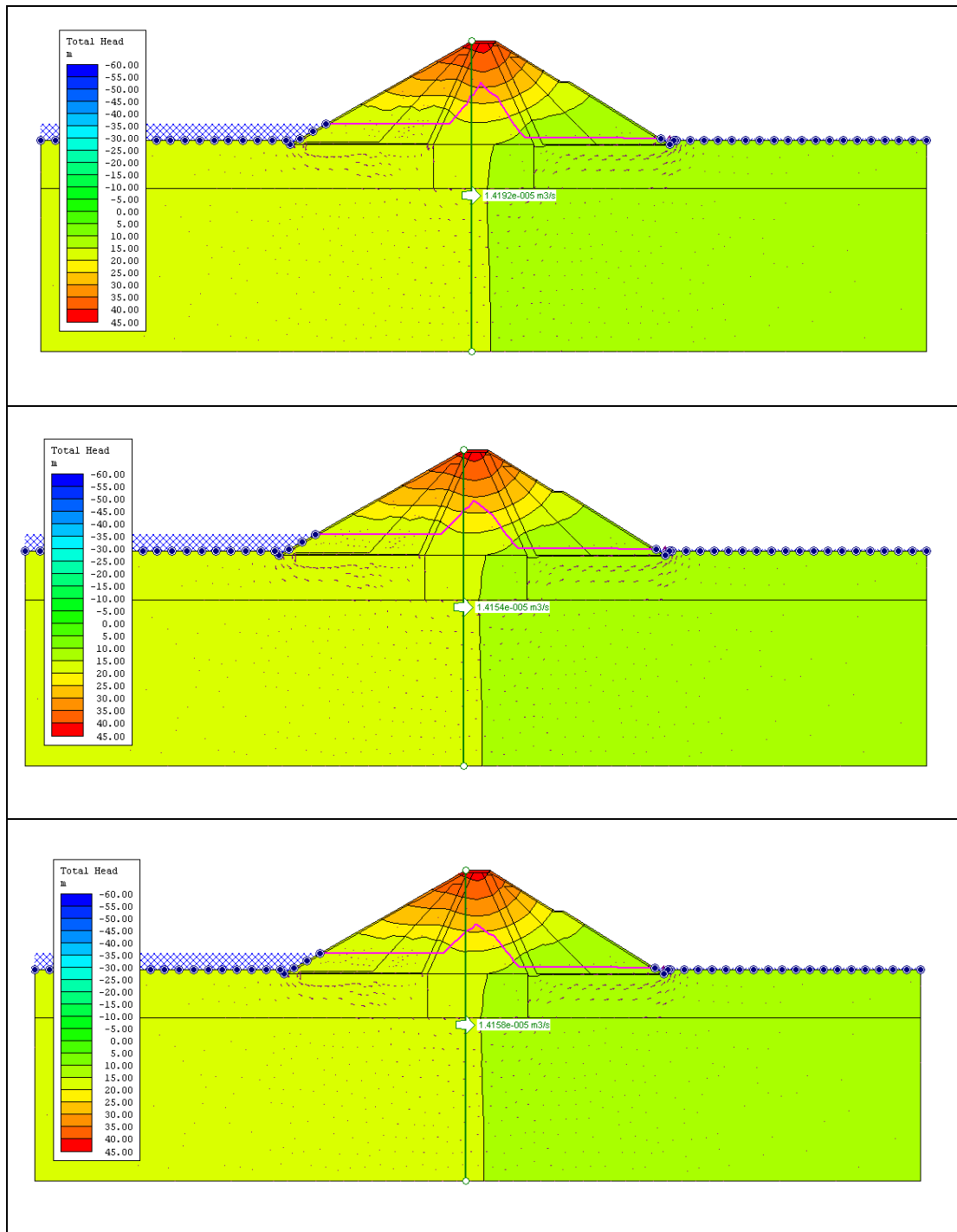


Fig. A.2.12 – RS2 - Carga hidráulica para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

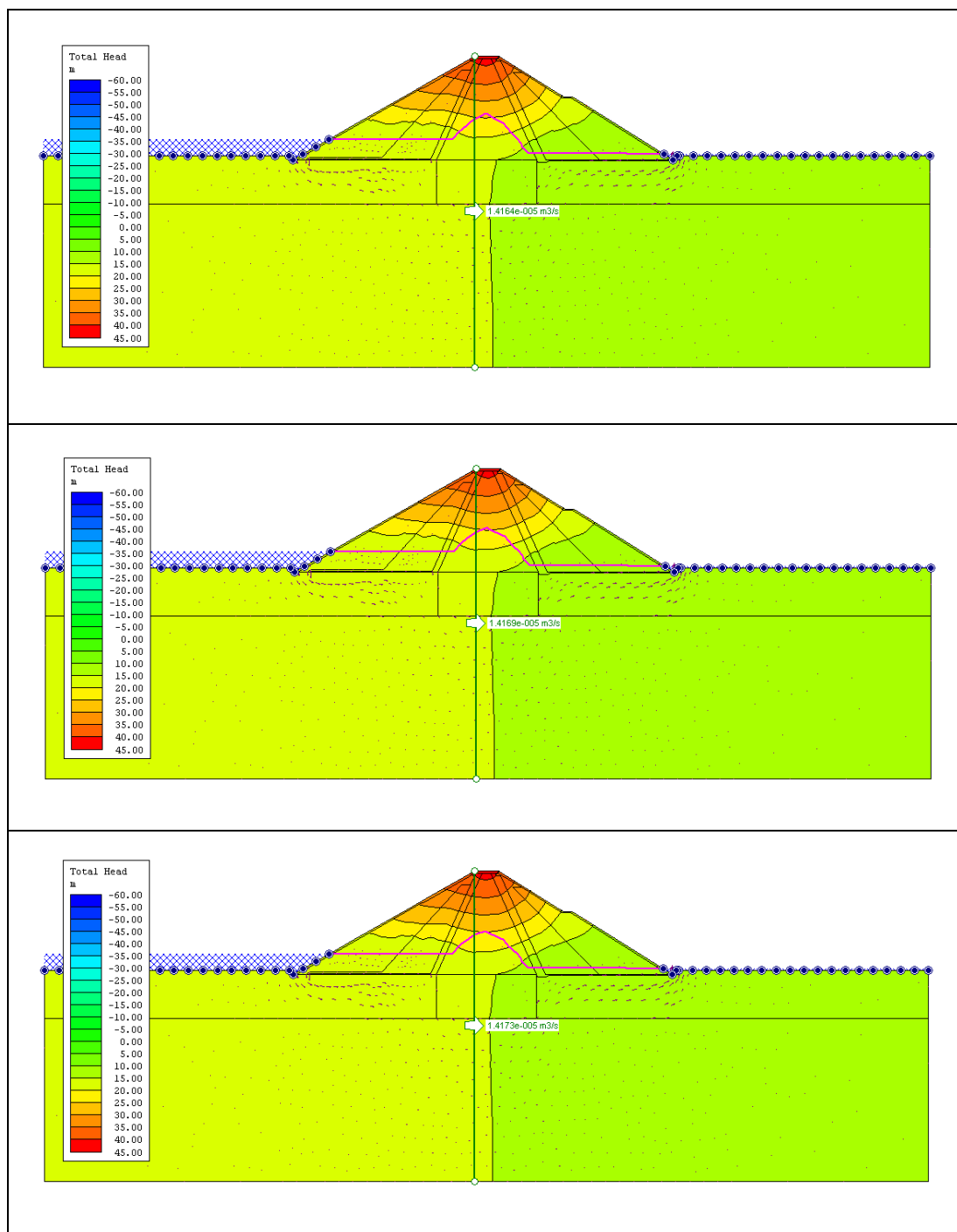


Fig. A.2.13 – RS2 - Carga hidráulica para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

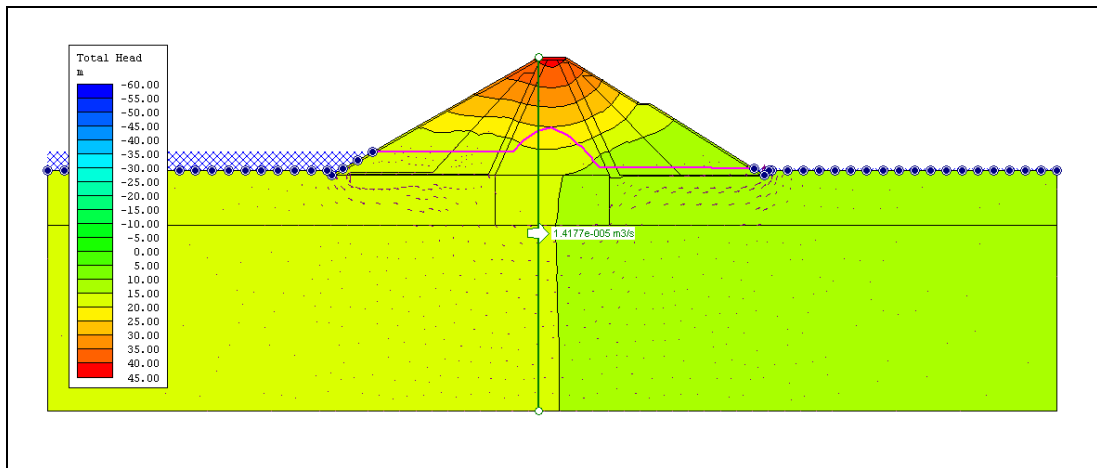


Fig. A.2.14 – RS2 - Carga hidráulica para 120 dias.

De forma semelhante são apresentados os resultados obtidos pelos dois programas relativos à altura piezométrica, começando pelo SEEP/W nas Figs. A.2.15 a A.2.21.

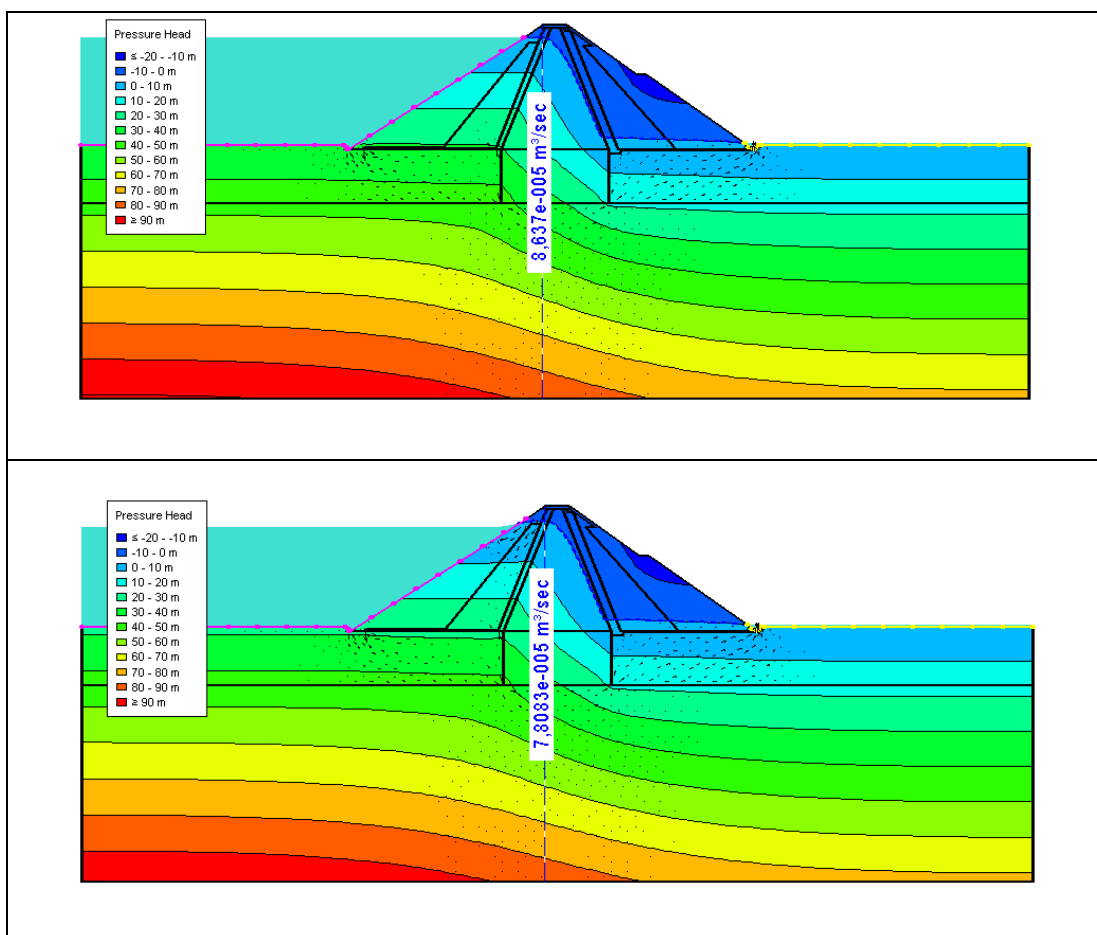


Fig. A.2.15 – SEEP/W - Altura piezométrica para o tempo inicial e 6 horas.

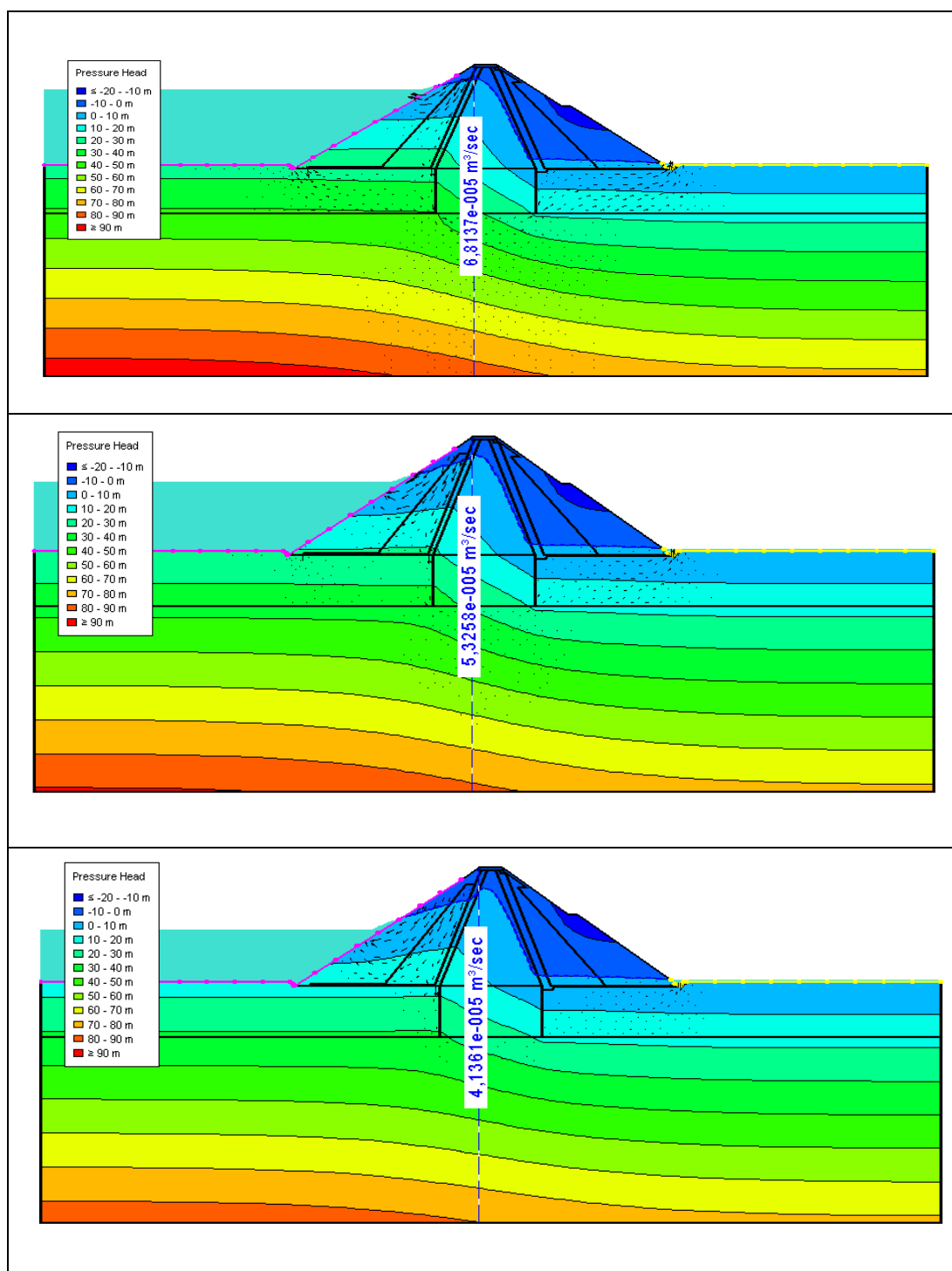


Fig. A.2.16 – SEEP/W - Altura piezométrica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

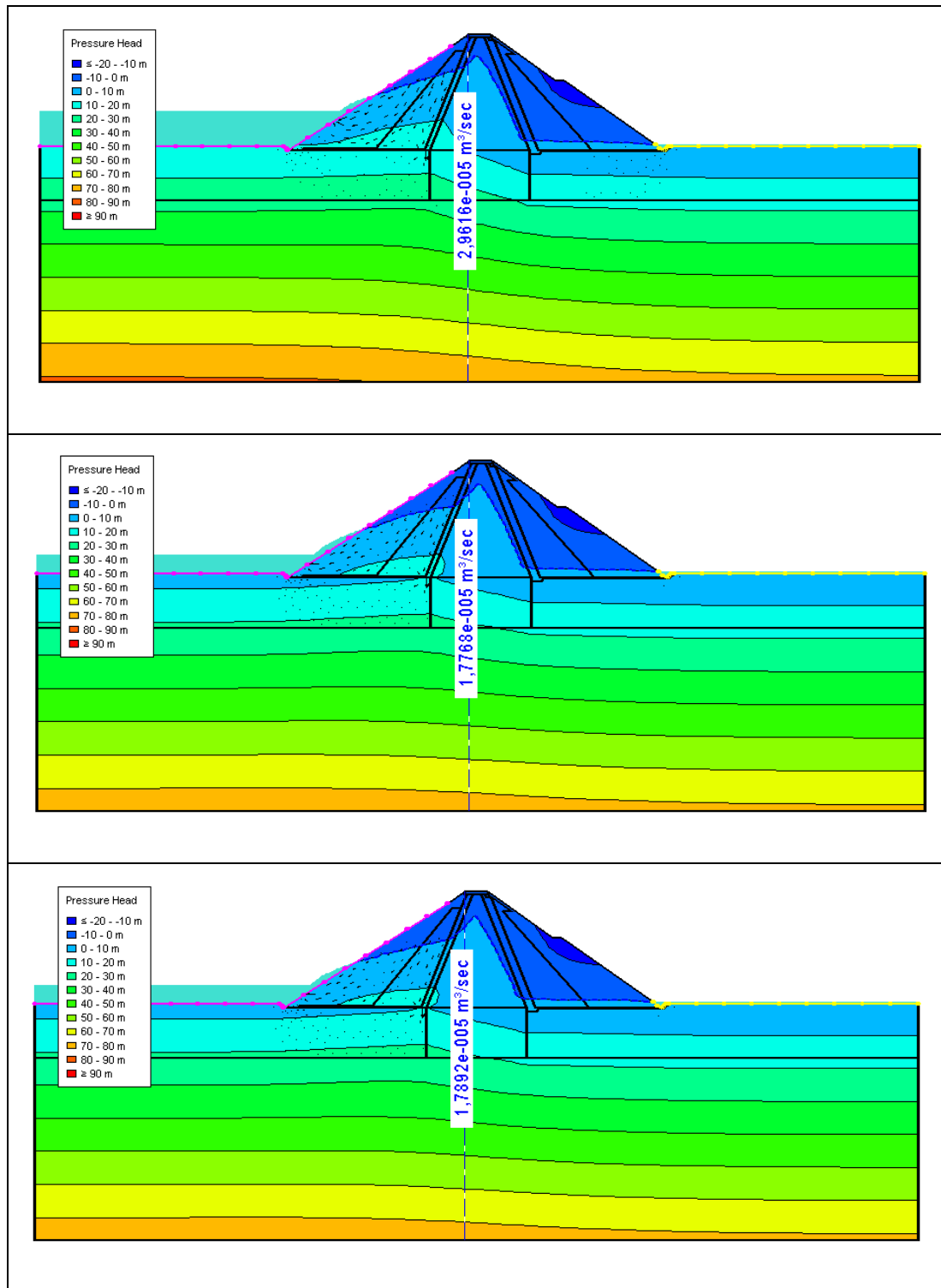


Fig. A.2.17 – SEEP/W - Altura piezométrica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

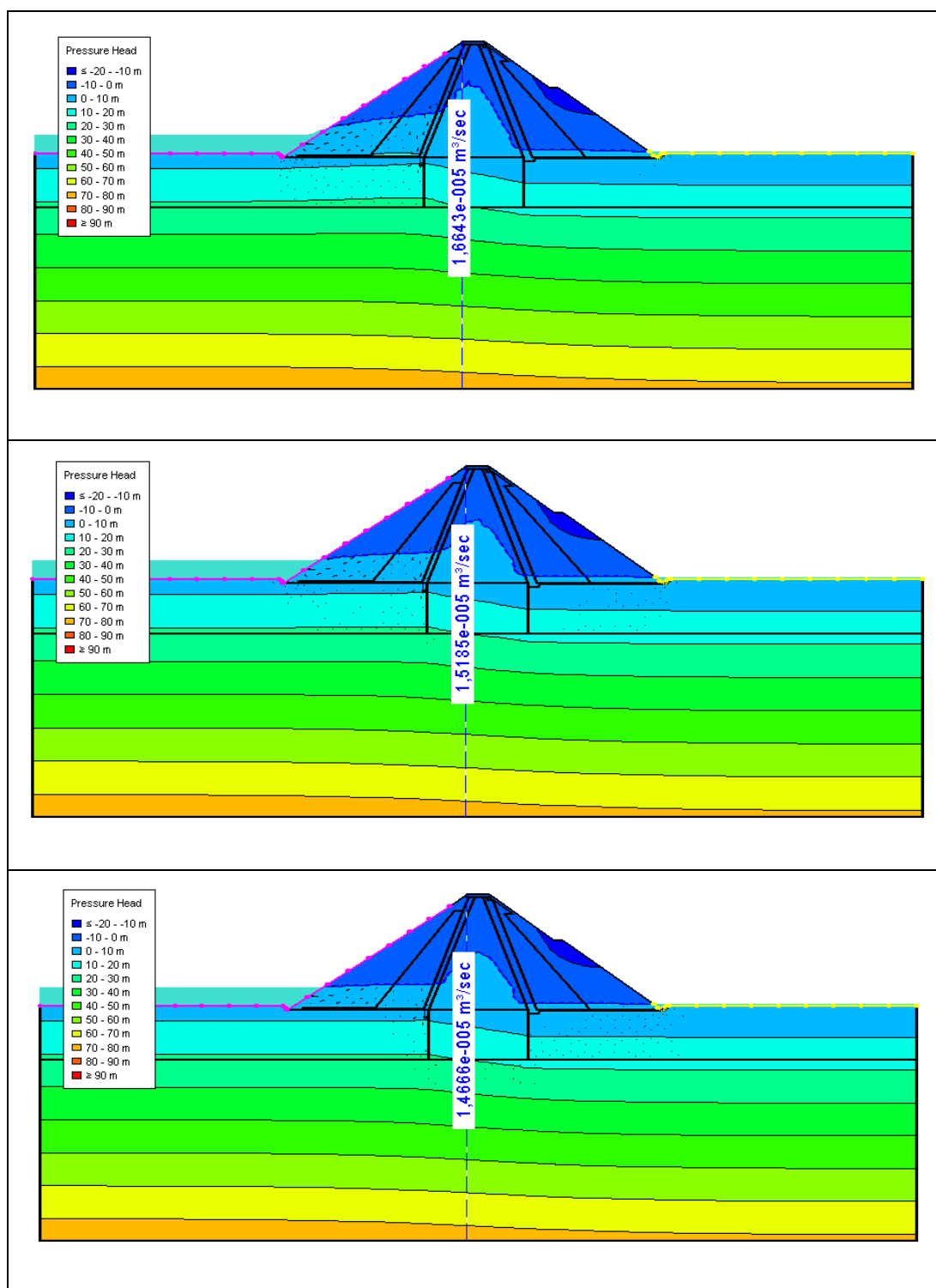


Fig. A.2.18 – SEEP/W - Altura piezométrica para 7 dias, 15 dias e 21 dias.

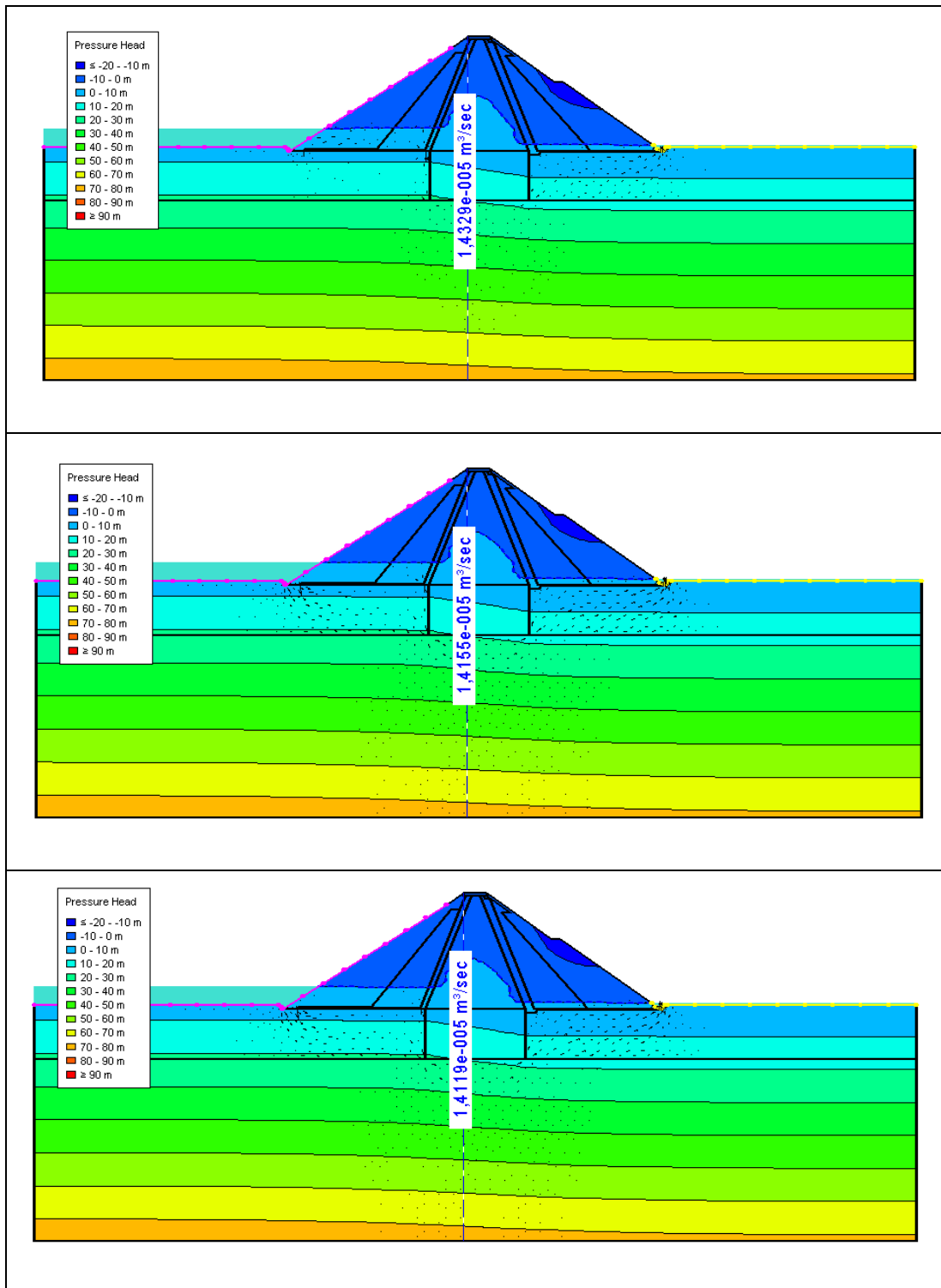


Fig. A.2.19 – SEEP/W - Altura piezométrica para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

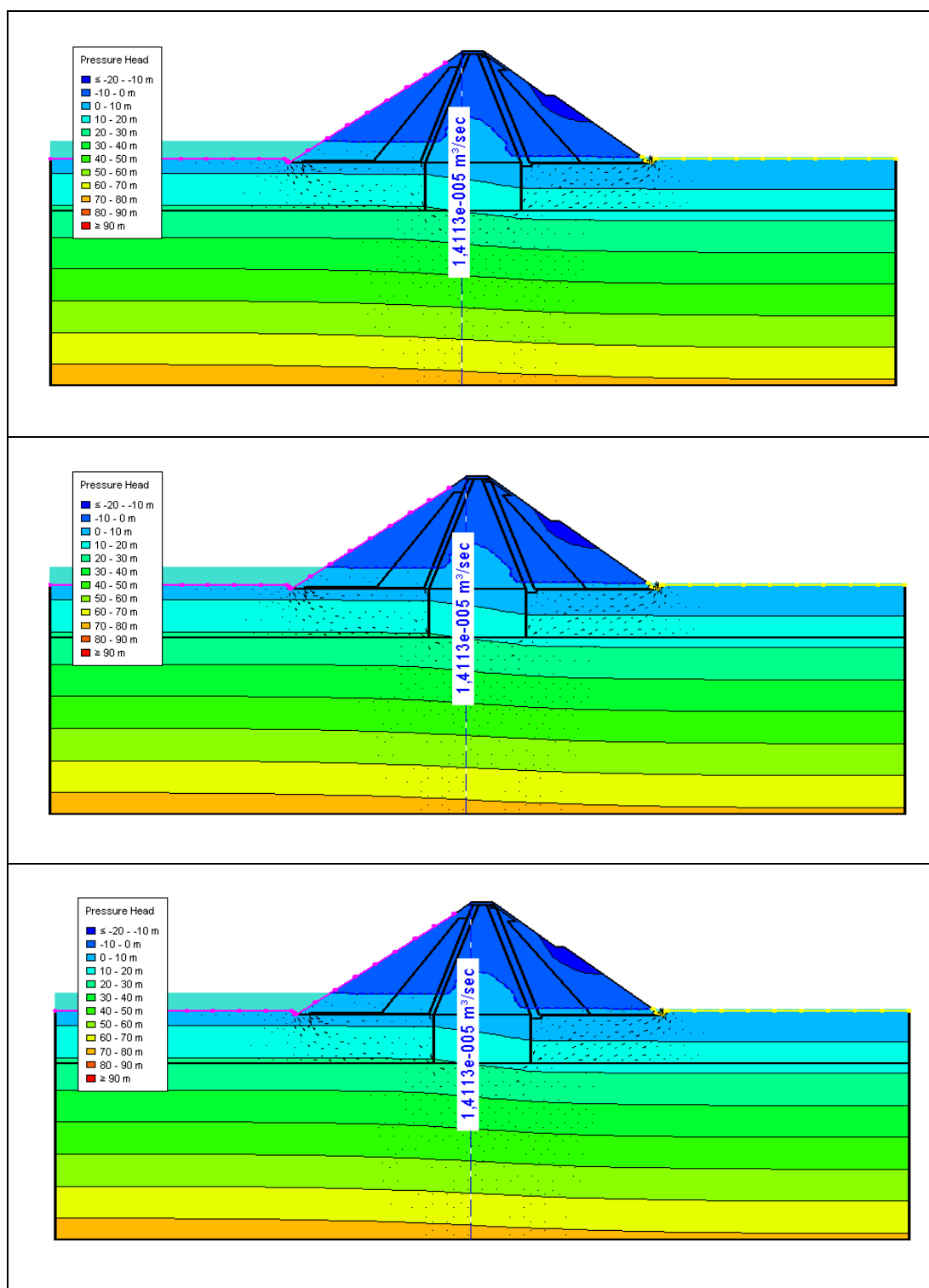


Fig. A.2.20 – SEEP/W - Altura piezométrica para 75 dias, 90 dias e 105 dias.



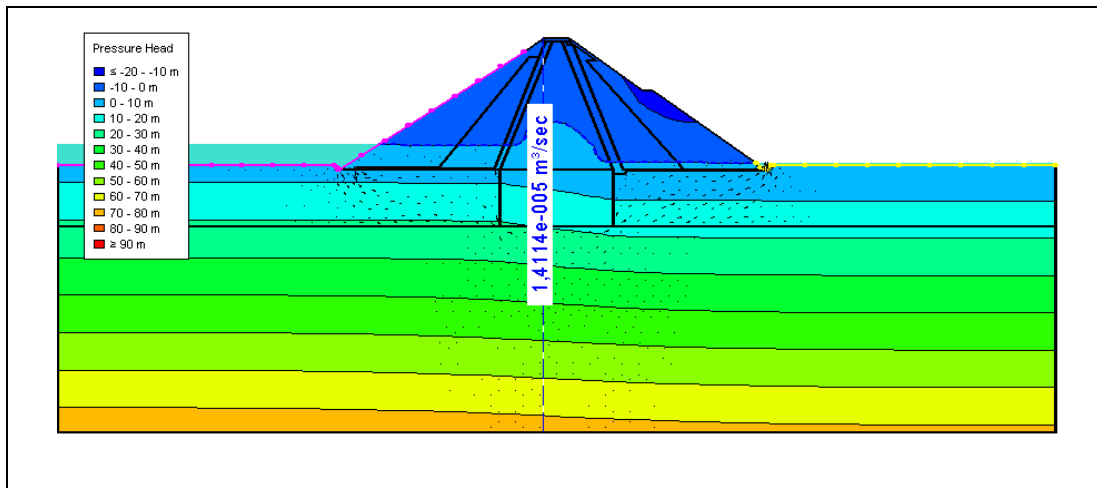


Fig. A.2.21 – SEEP/W - Altura piezométrica para 120 dias.

São agora apresentados, nas Figs. A.2.22 a A.2.28, os resultados obtidos pelo programa RS2 para a evolução de forma sequencial da altura piezométrica.

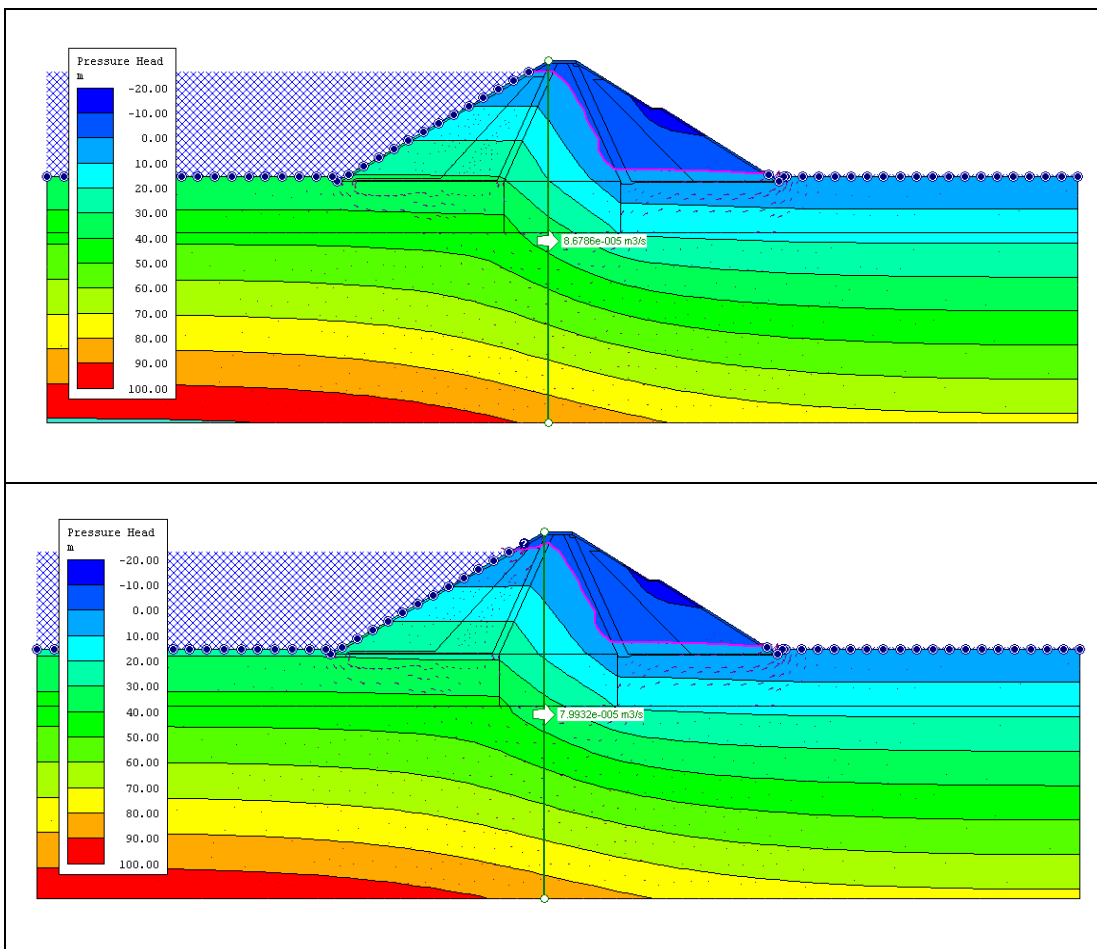


Fig. A.2.22 – RS2 - Altura piezométrica para o tempo inicial e 6 horas.

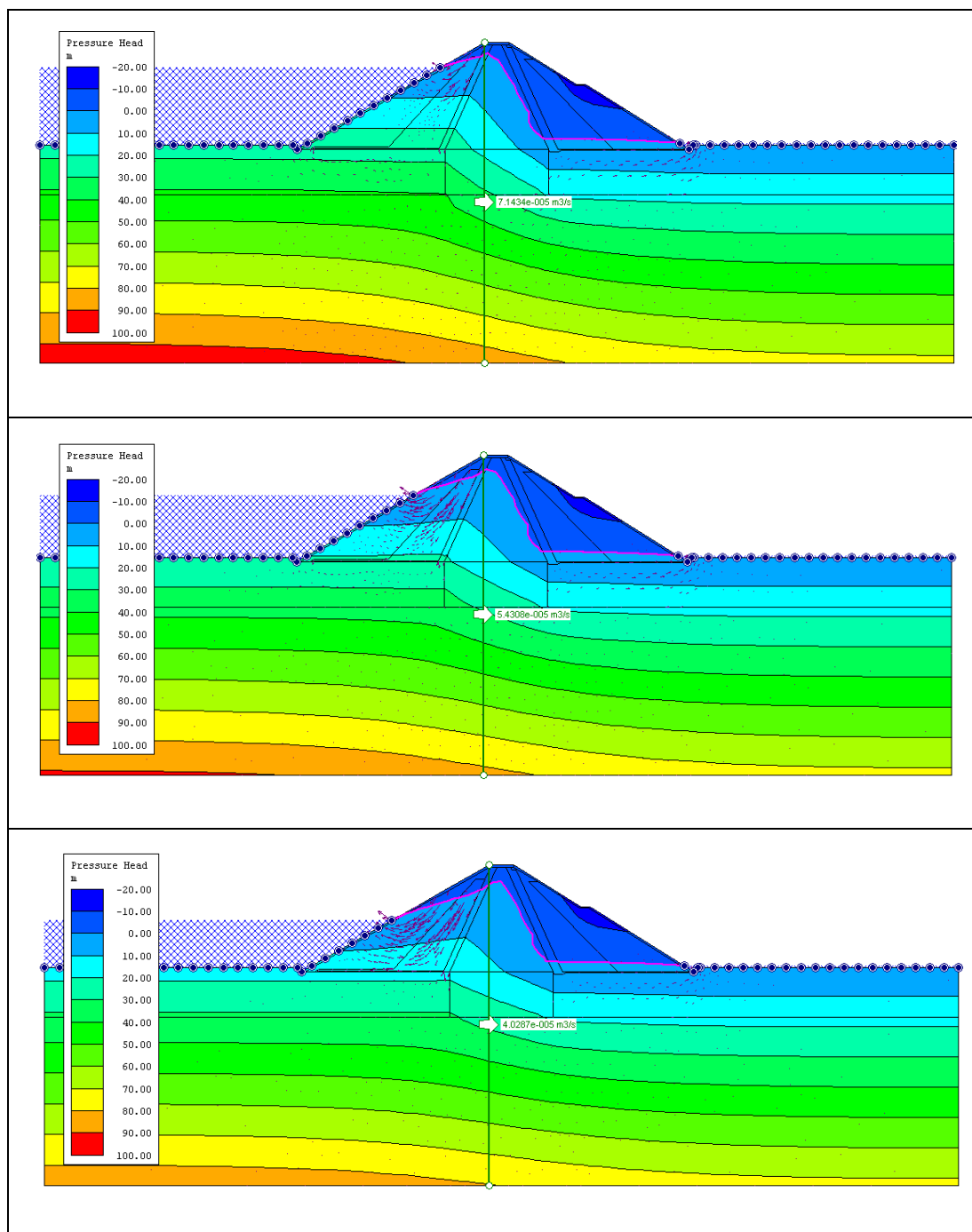


Fig. A.2.23 – RS2 - Altura piezométrica para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

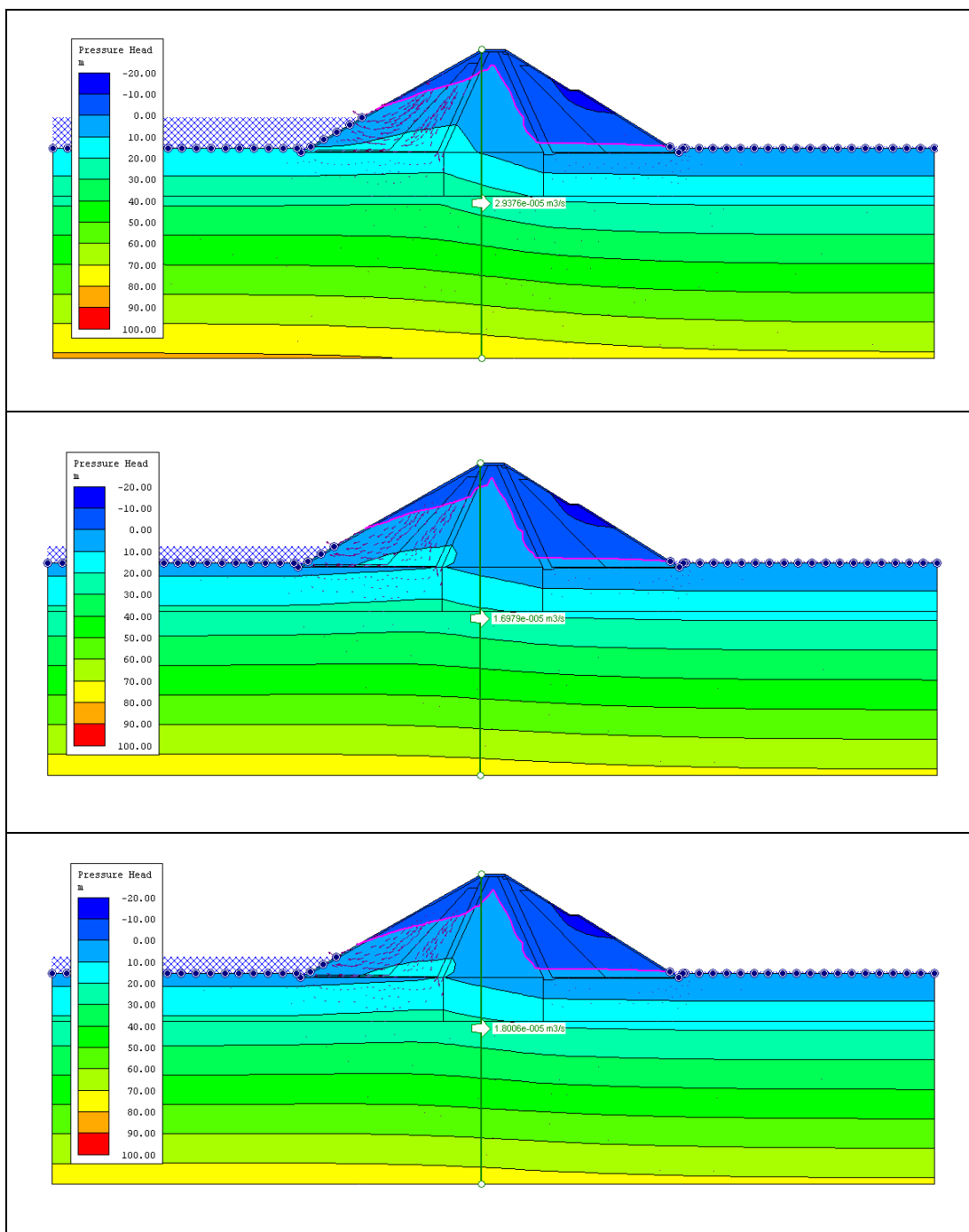


Fig. A.2.24 – RS2 - Altura piezométrica para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

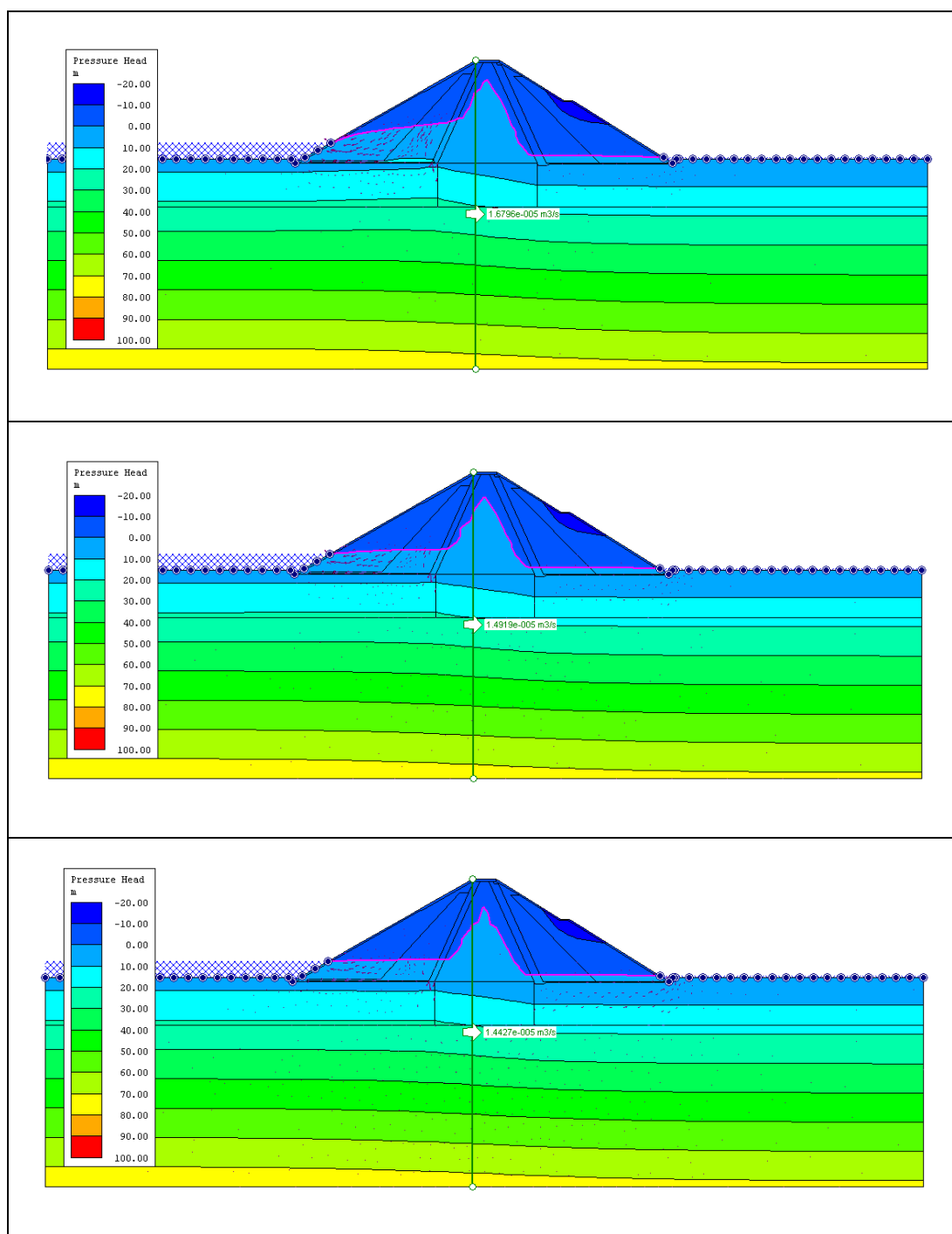


Fig. A.2.25 – RS2 - Altura piezométrica para 7 dias, 15 dias e 21 dias.

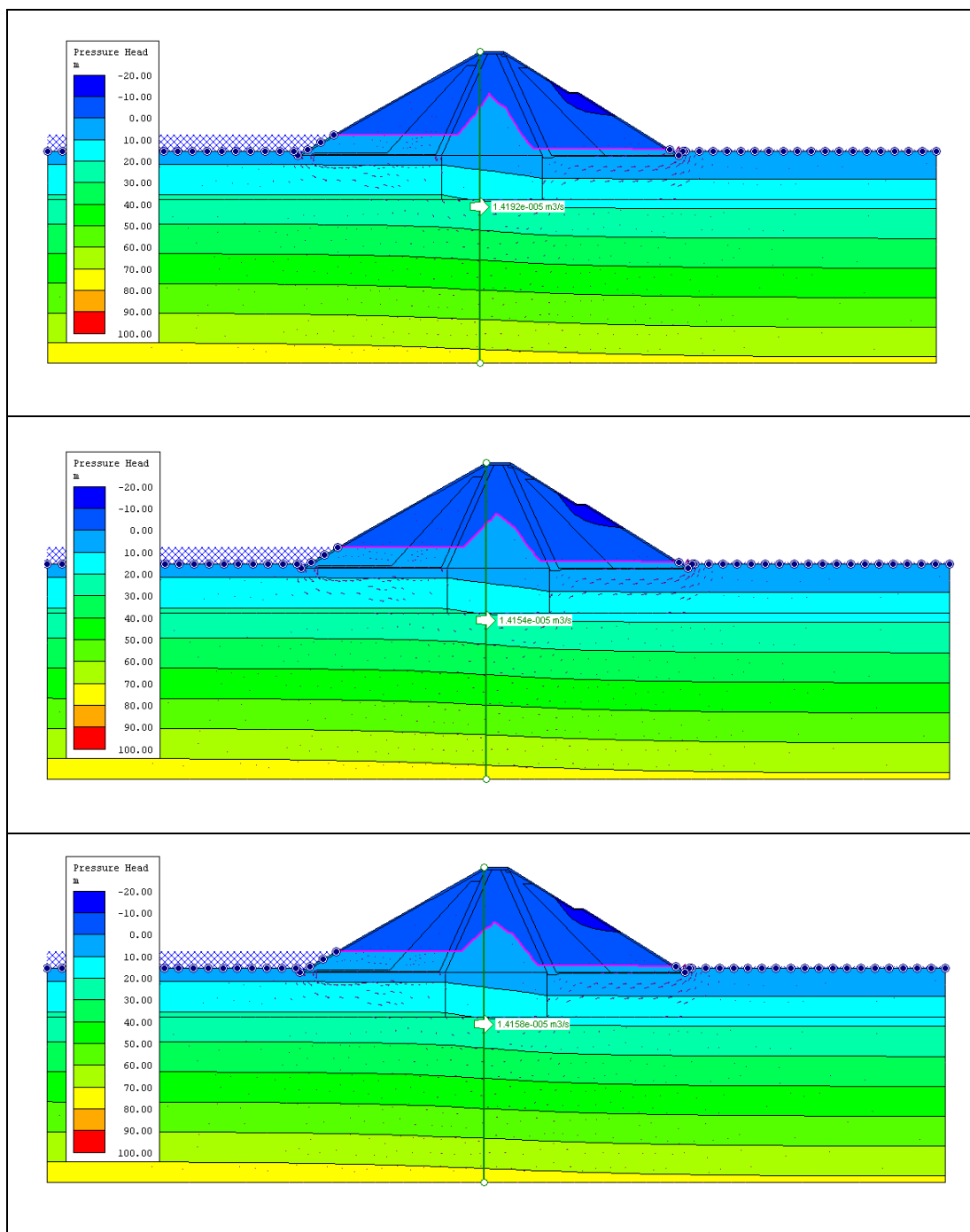


Fig. A.2.26 – RS2 - Altura piezométrica para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

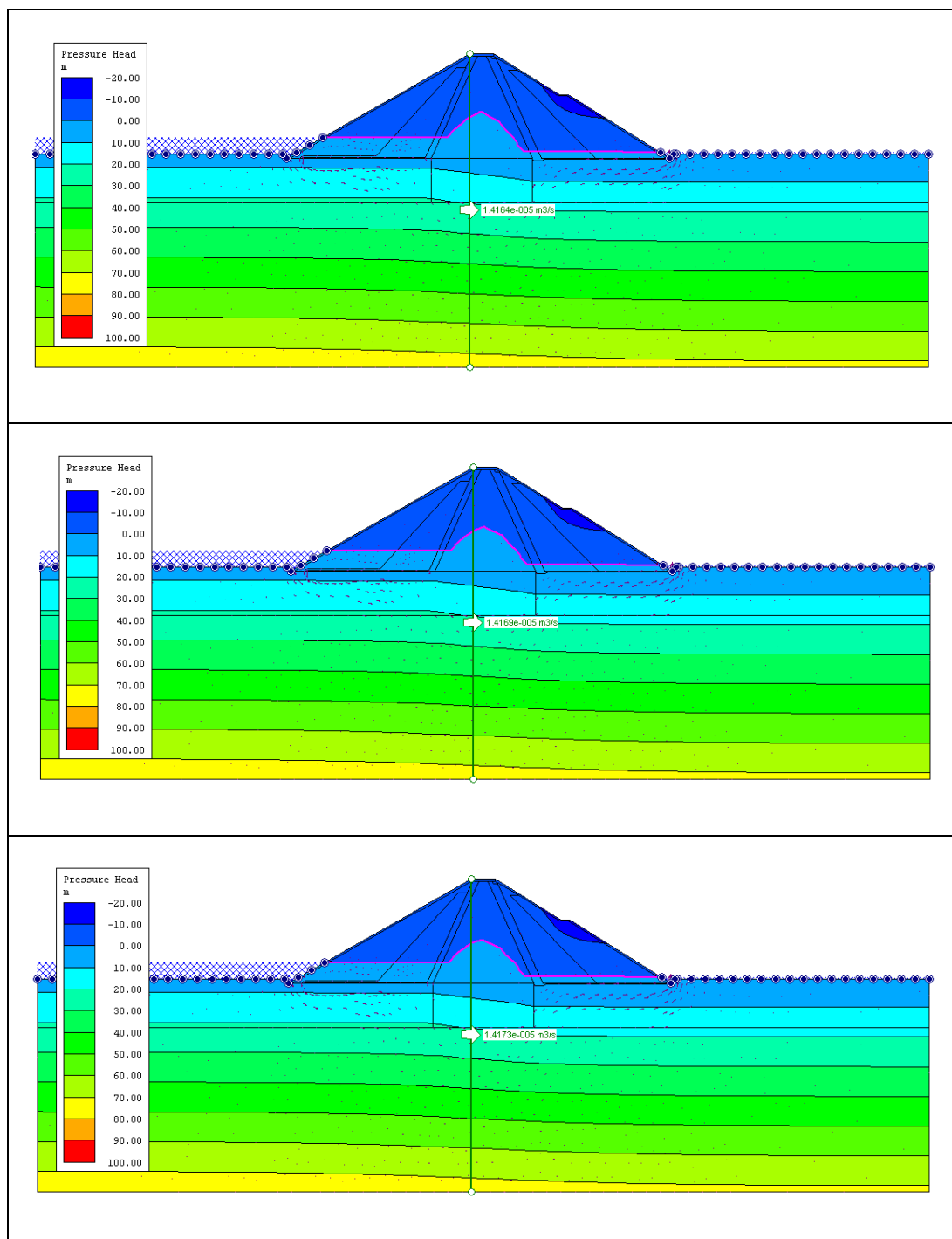


Fig. A.2.27 – RS2 - Altura piezométrica para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

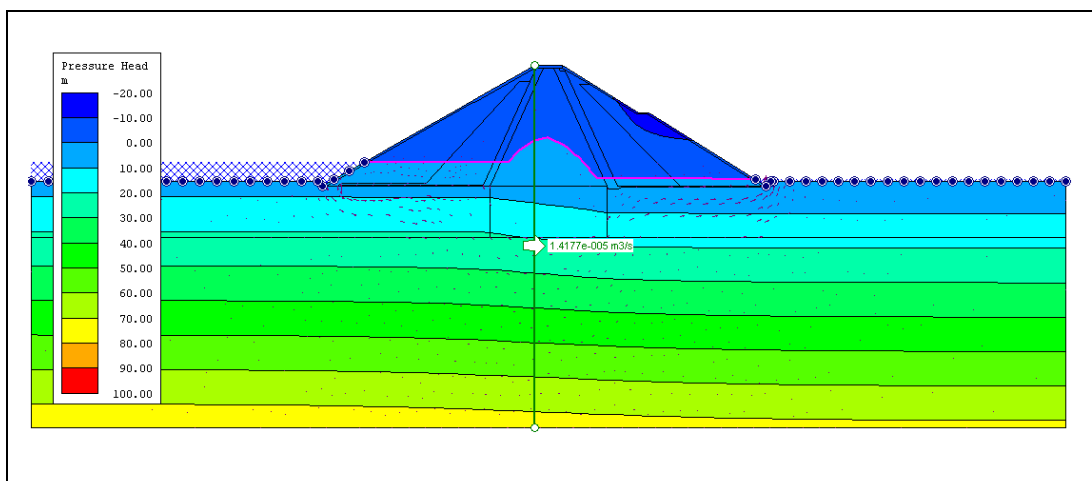


Fig. A.2.28 – RS2 - Altura piezométrica para 120 dias.

As Figs. A.2.29 a A.2.35 dizem respeito aos resultados obtidos pelo programa SEEP/W para análise de pressões neutras.

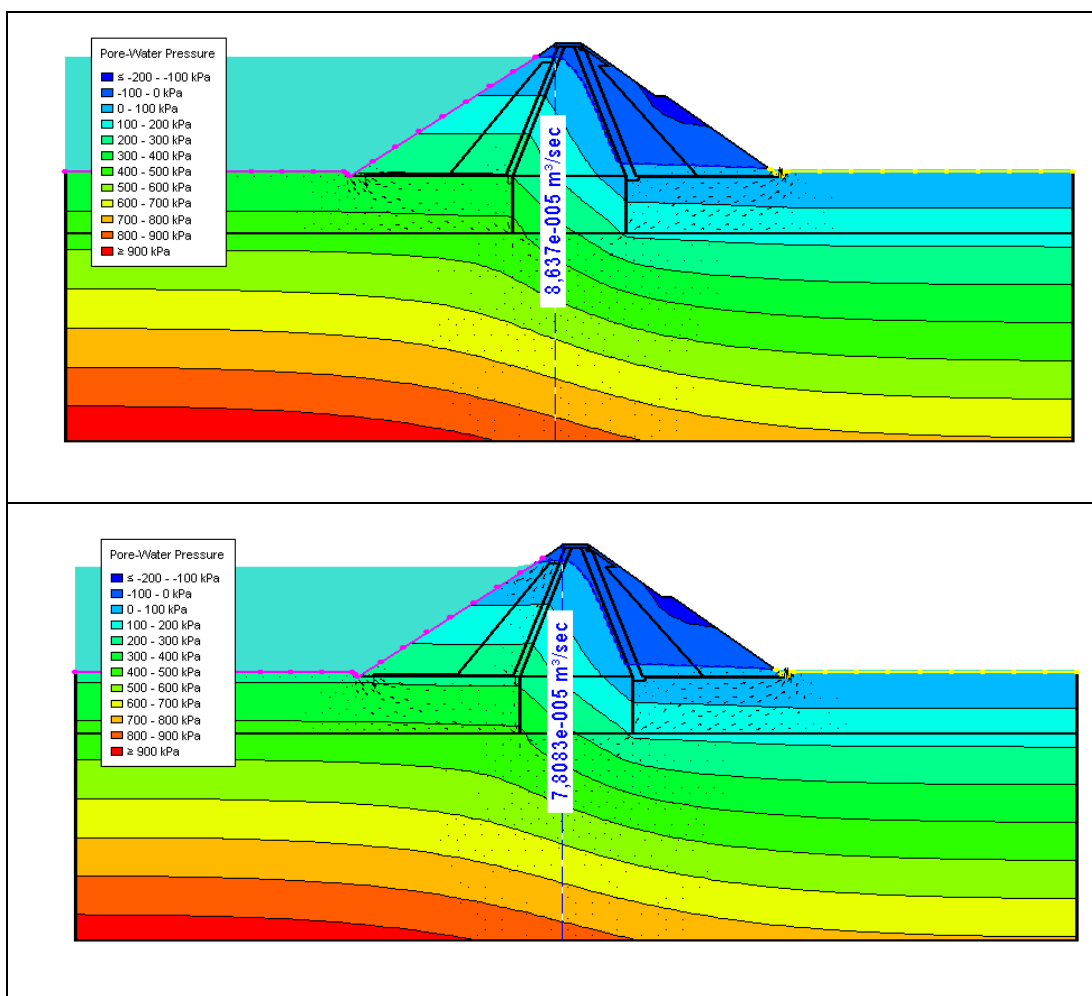


Fig. A.2.29 – SEEP/W - Pressões neutras para o tempo inicial e 6 horas

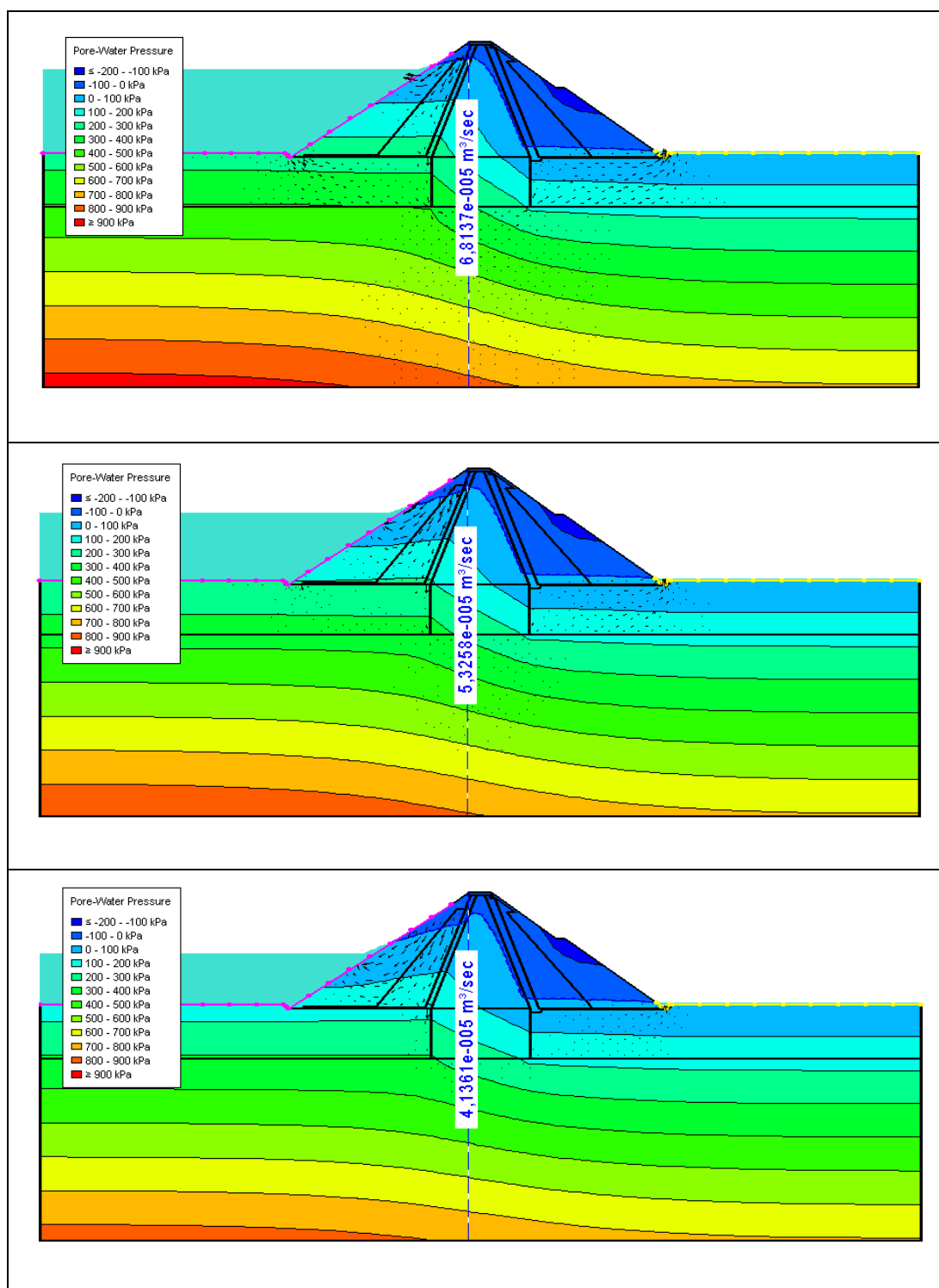


Fig. A.2.30 – SEEP/W - Pressões neutras para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.



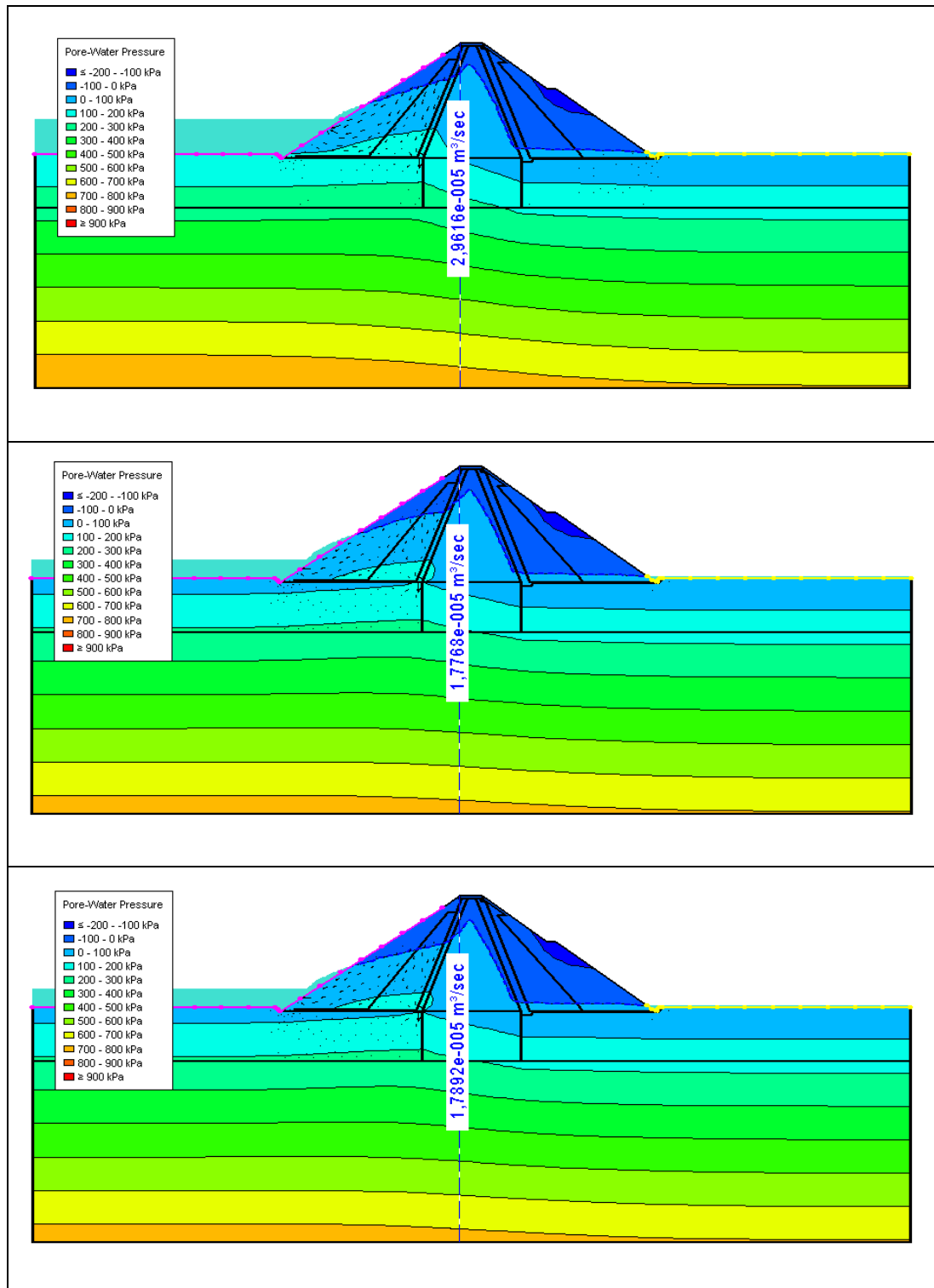


Fig. A.2.31 – SEEP/W - Pressões neutras para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

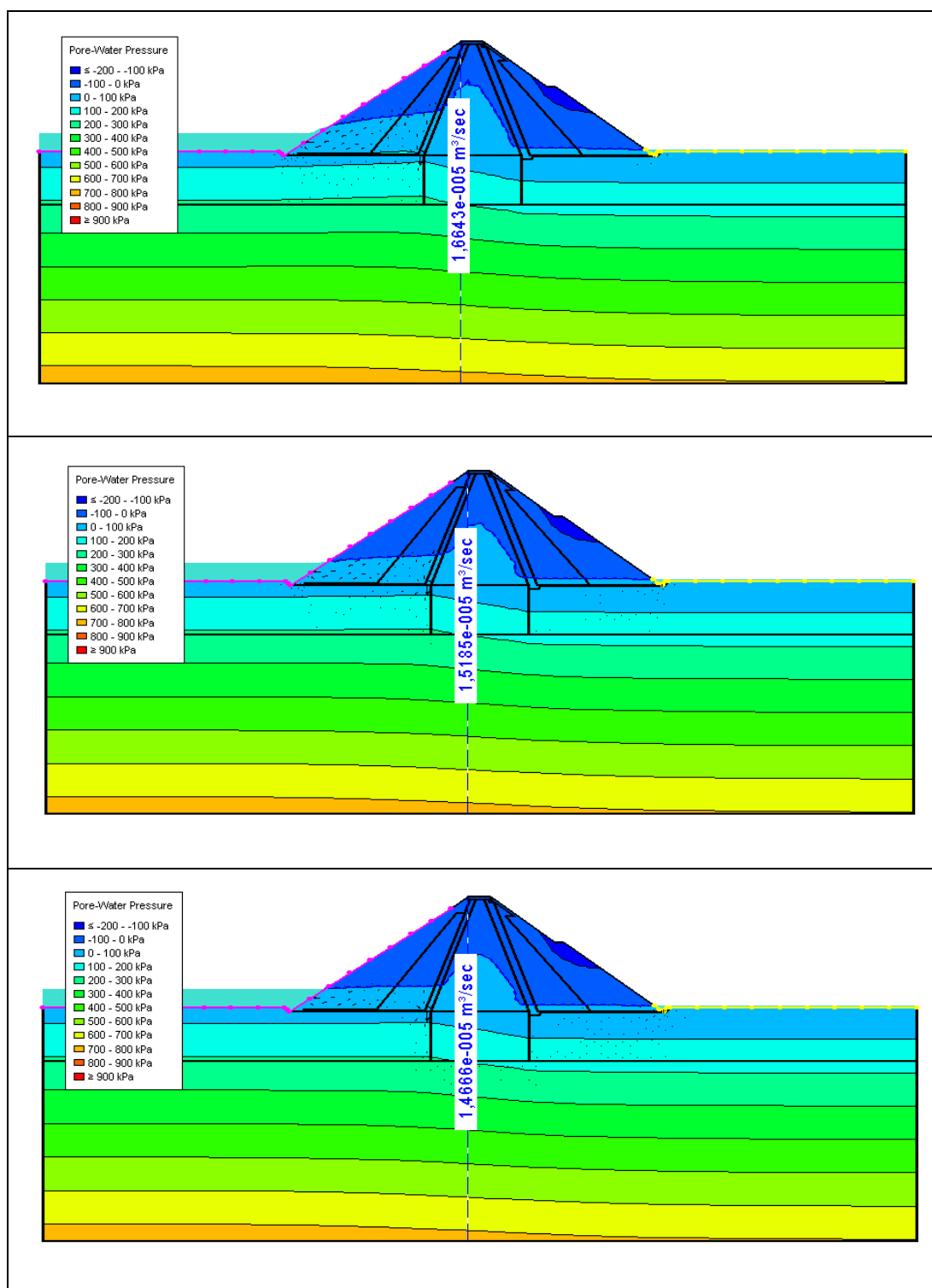


Fig. A.2.32 – SEEPW - Pressões neutras para 7 dias, 15 dias e 21 dias.

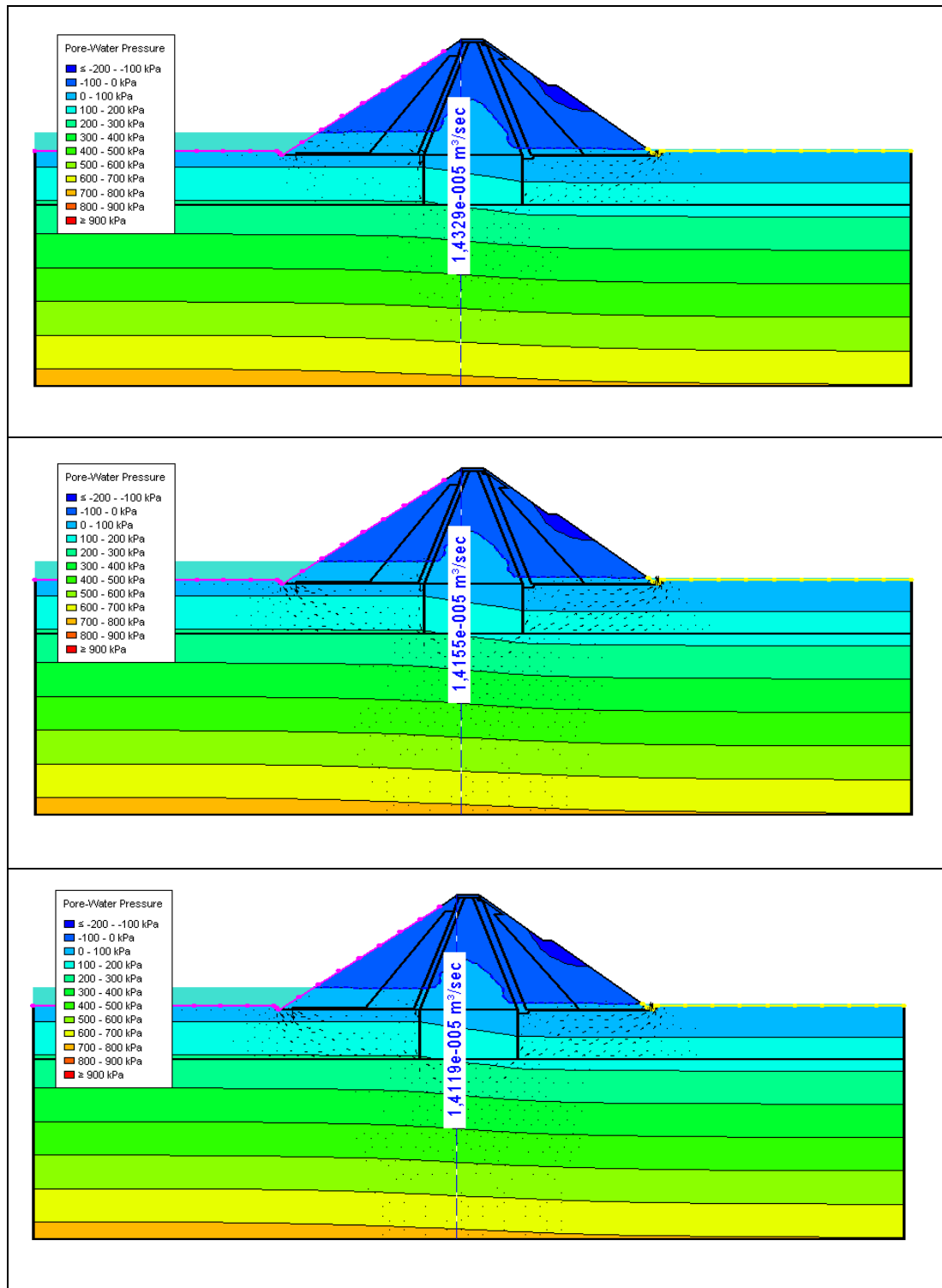


Fig. A.2.33 – SEEP/W - Pressões neutras para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

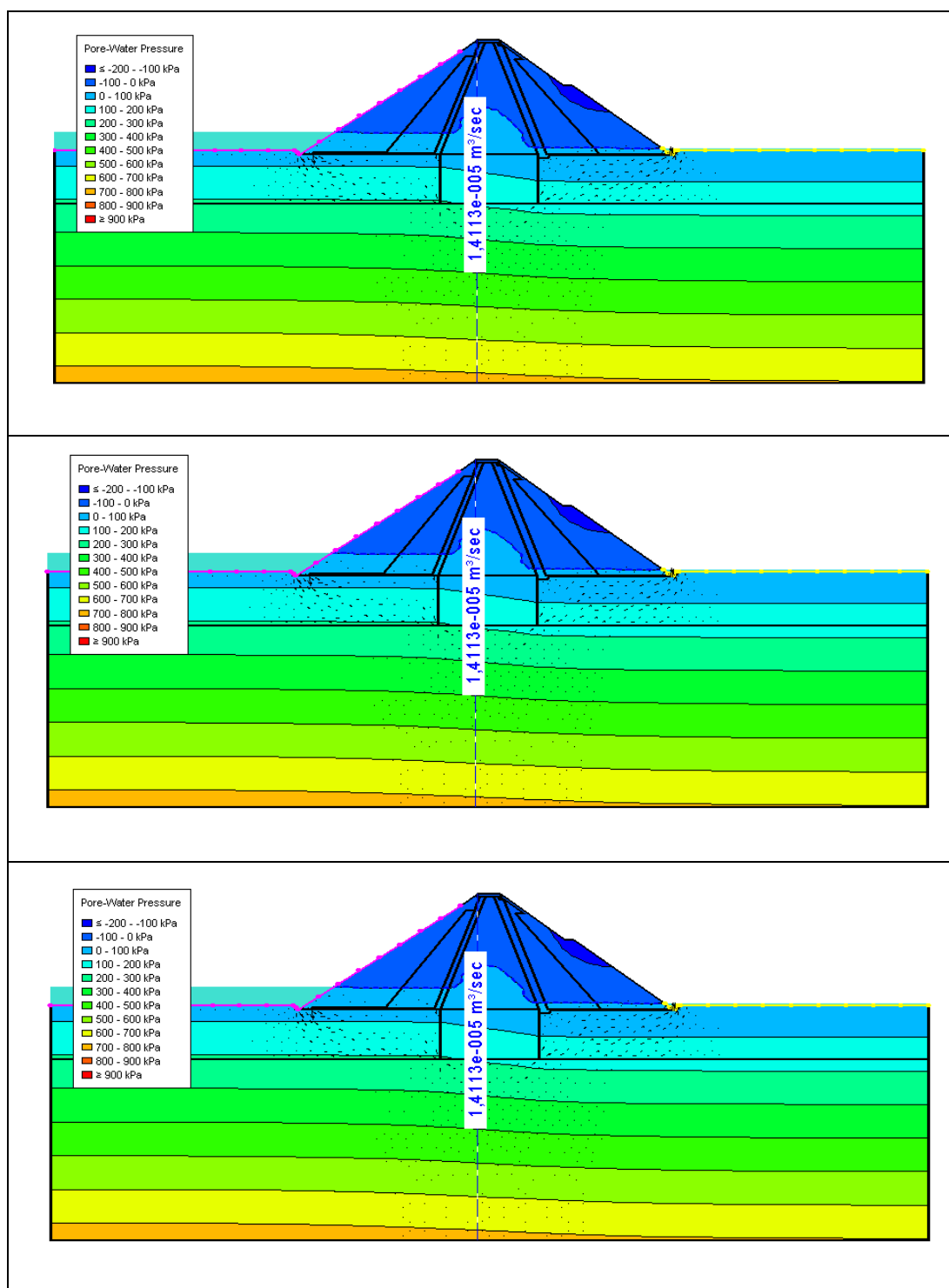


Fig. A.2.34 – SEEP/W - Pressões neutras para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

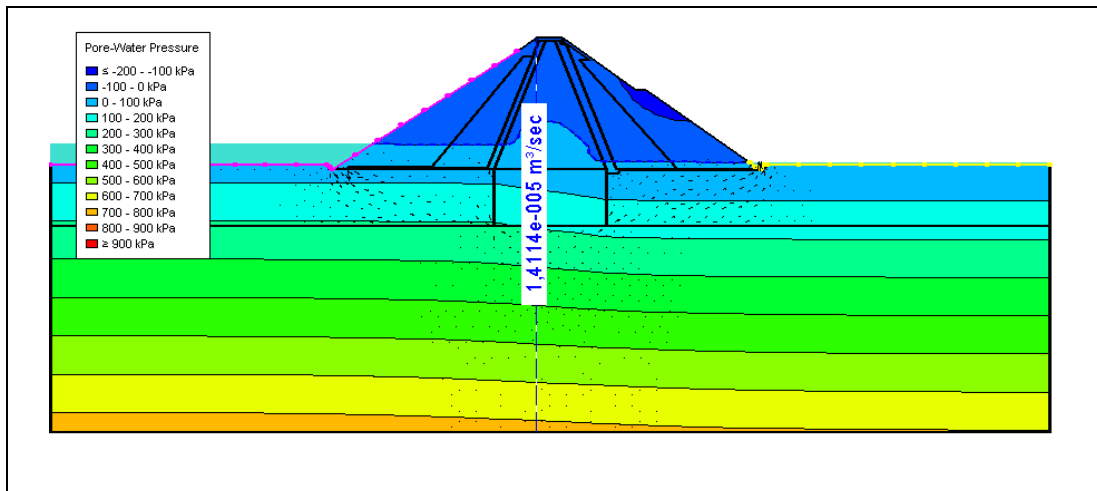


Fig. A.2.35 – SEEP/W - Pressões neutras para 120 dias.

Os resultados obtidos pelo o programa RS2 para a evolução das pressões neutras são apresentados nas Figs. A.2.36 a A.2.42.

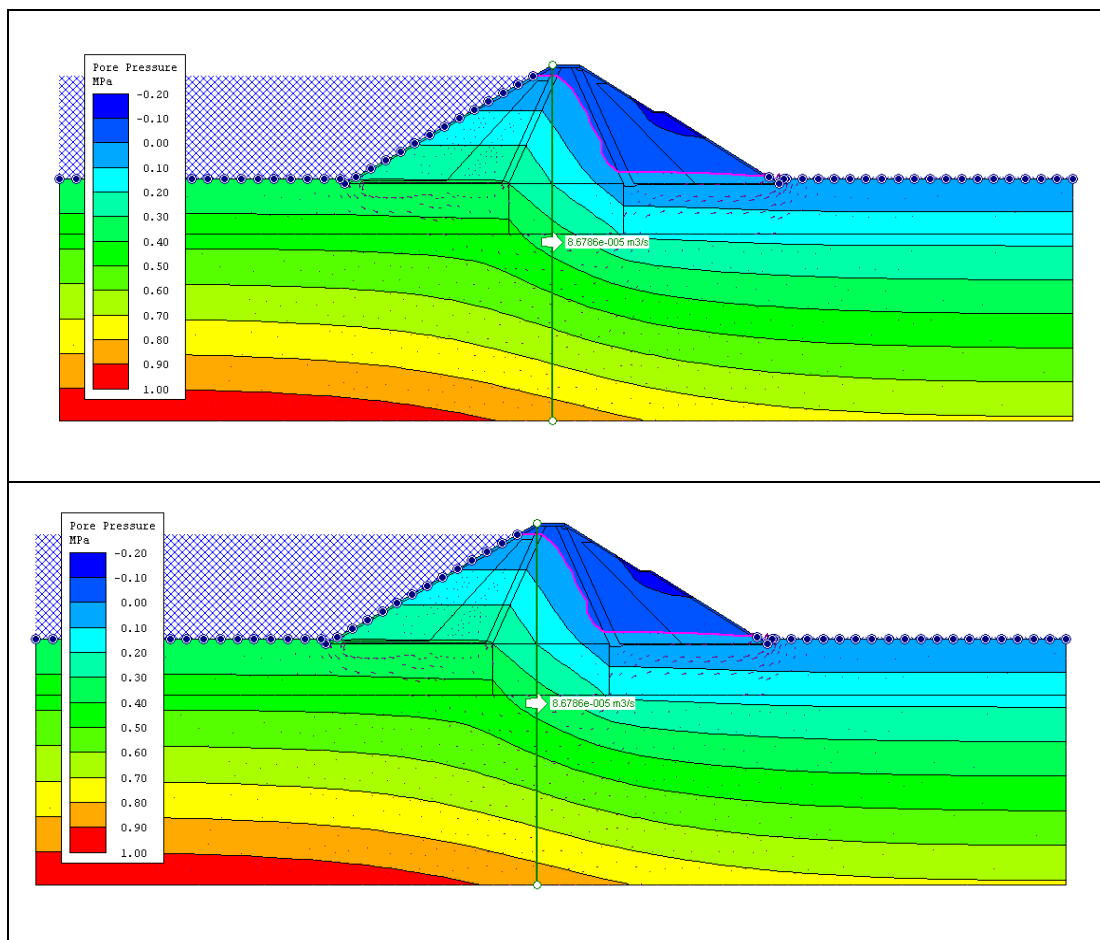


Fig. A.2.36 – RS2 - Pressões neutras para o tempo inicial e 6 horas.

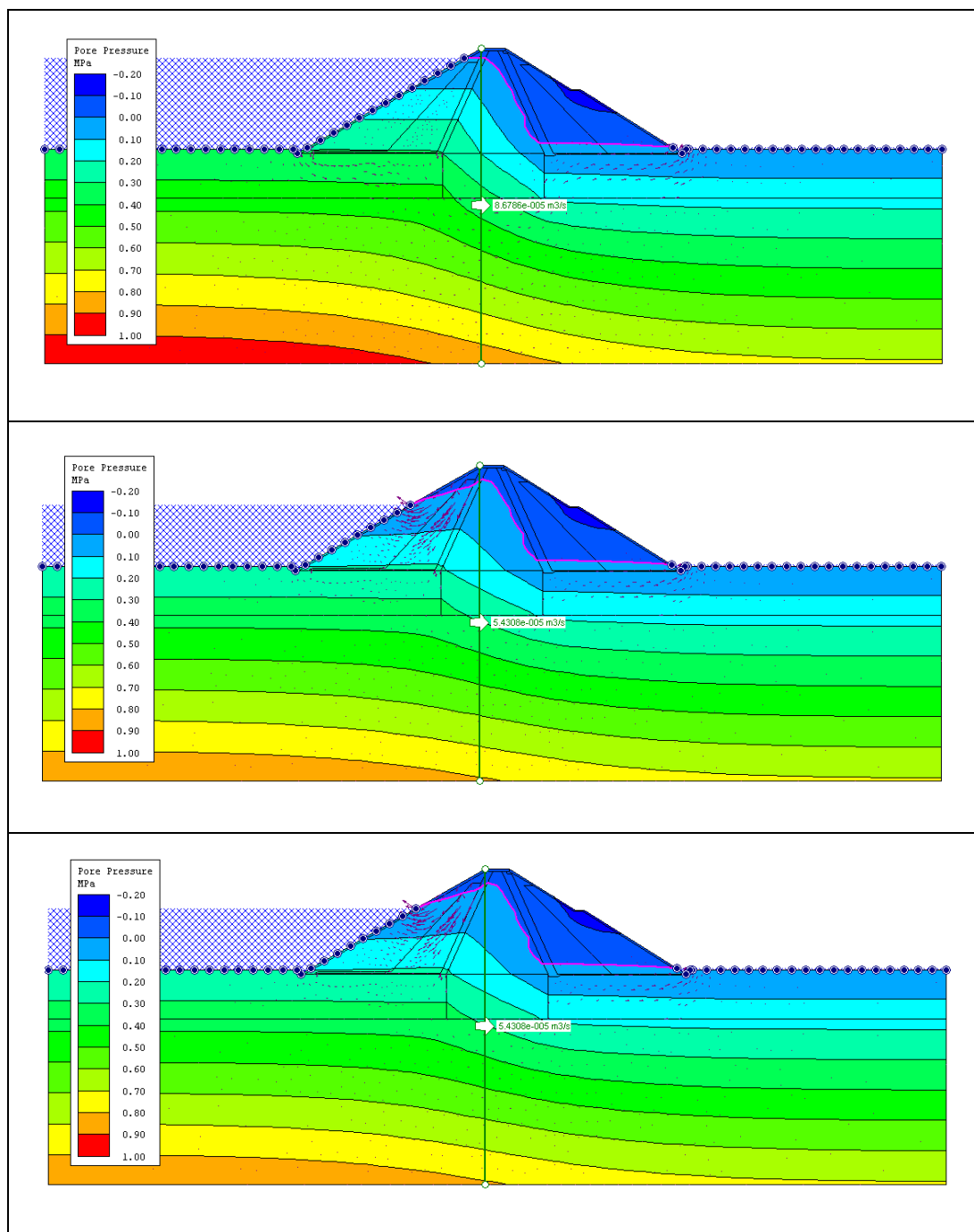


Fig. A.2.37 – RS2 - Pressões neutras para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

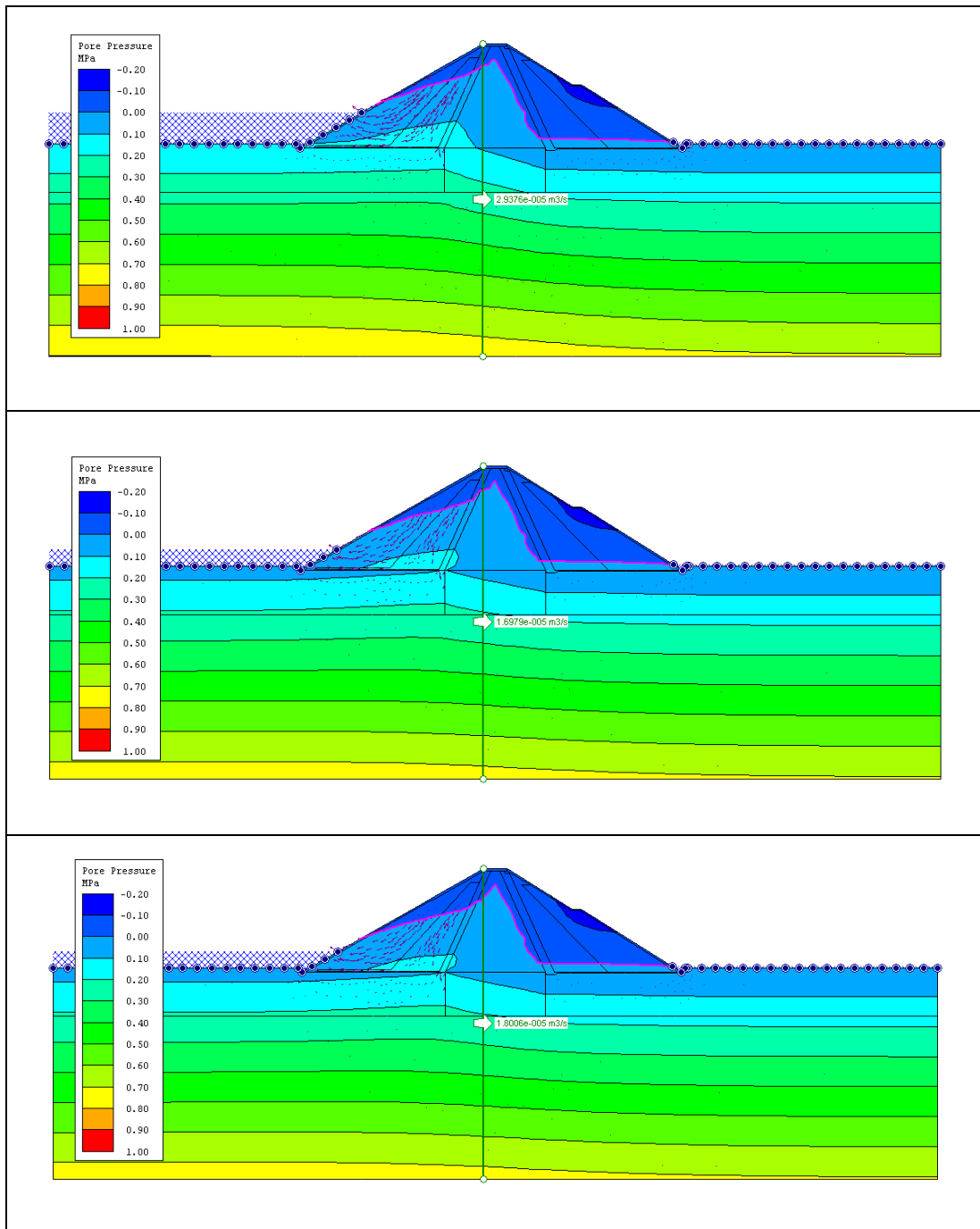


Fig. A.2.38 – RS2 - Pressões neutras para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

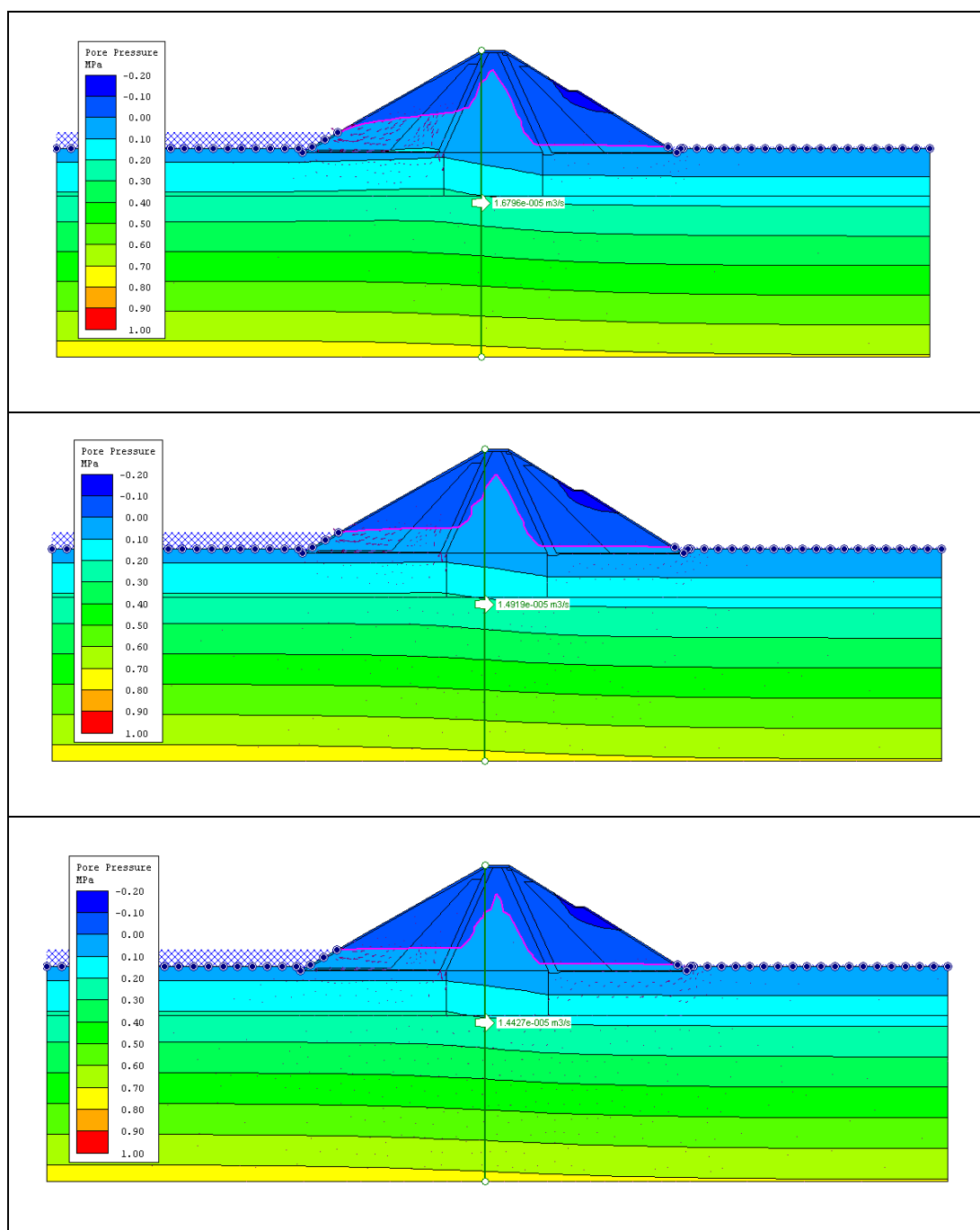


Fig. A.2.39 – RS2 - Pressões neutras para 7 dias, 15 dias e 21 dias.



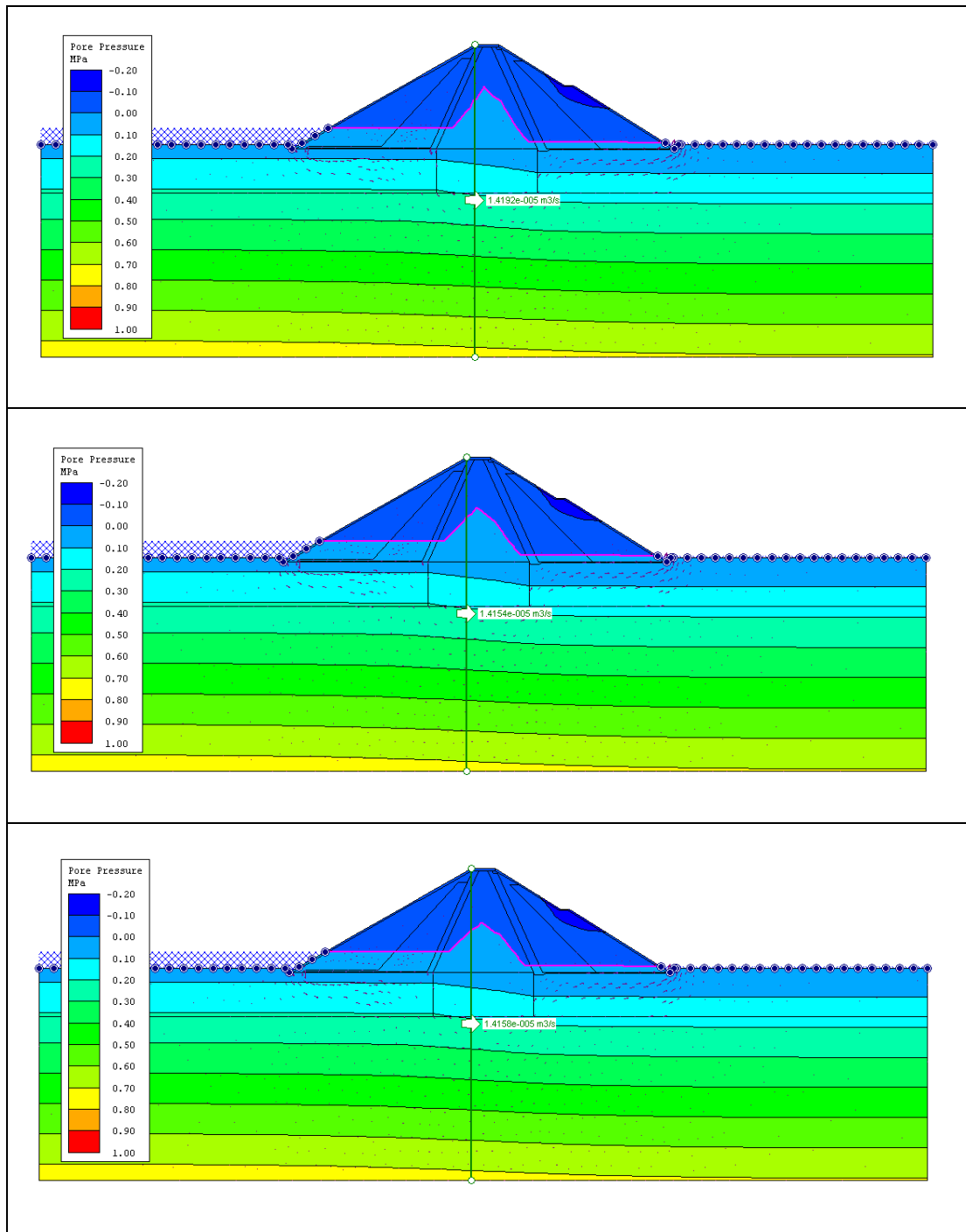


Fig. A.2.40 – RS2 - Pressões neutras para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

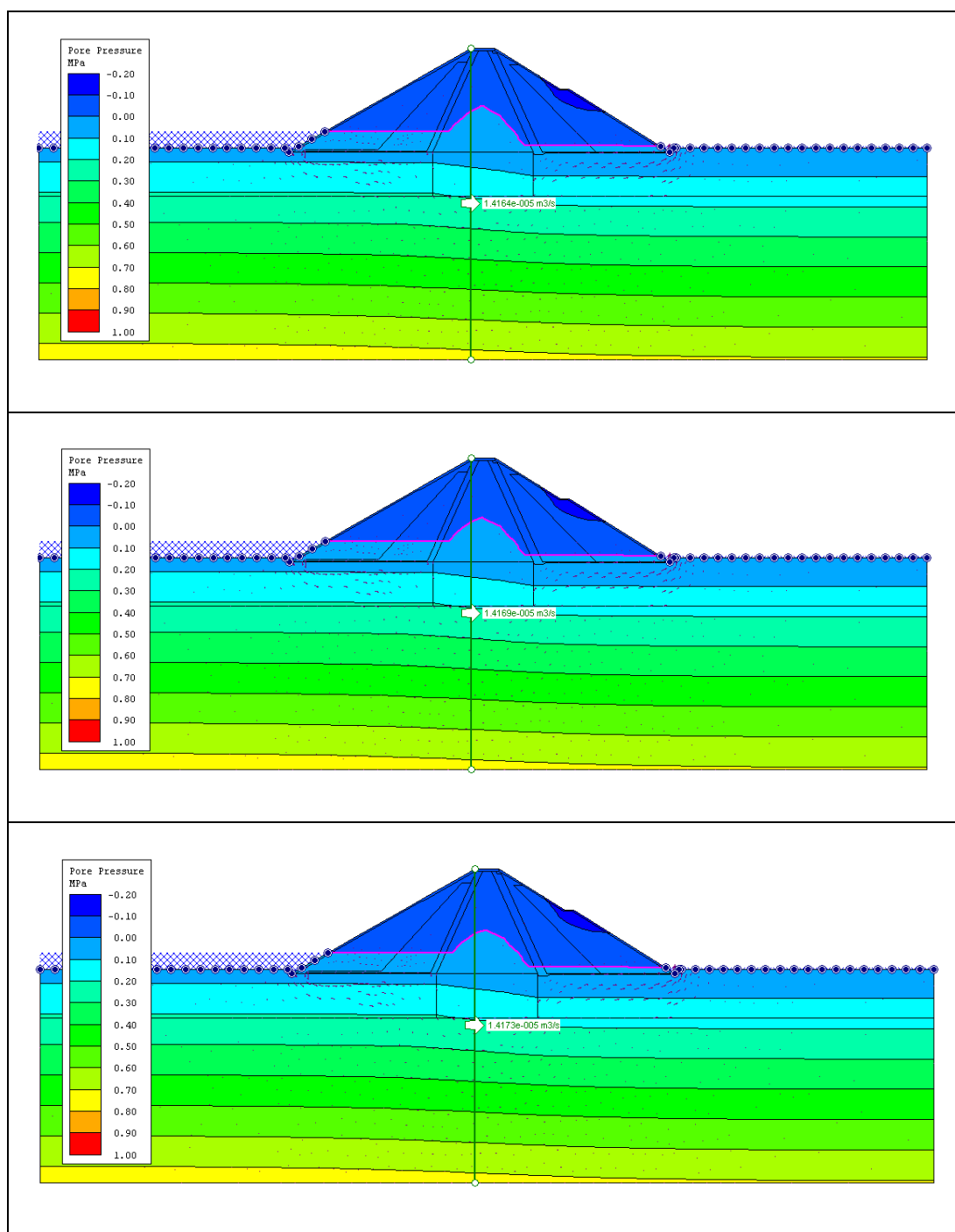


Fig. A.2.41 – RS2 - Pressões neutras para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

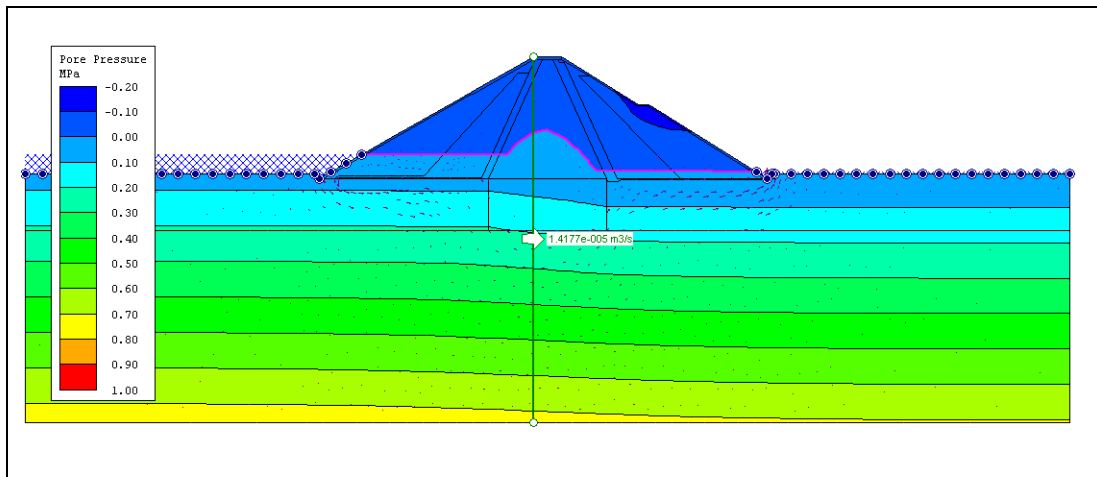


Fig. A.2.42 – RS2 - Pressões neutras para 120 dias.



## ANEXO III

### A3.1. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MONTANTE, SITUAÇÃO DE ESVAZIAMENTO RÁPIDO

No presente Anexo são apresentados os resultados relativos às análises de estabilidade de montante do modelo na situação de esvaziamento rápido, realizadas no SLOPE/W e no SLIDE. As imagens que se seguem descrevem a evolução do fator de segurança associado ao deslizamento de superfícies de escorregamento. Começa-se pelos resultados obtidos pelo SLOPE/W nas Figs. A.3.1 a A.3.7.

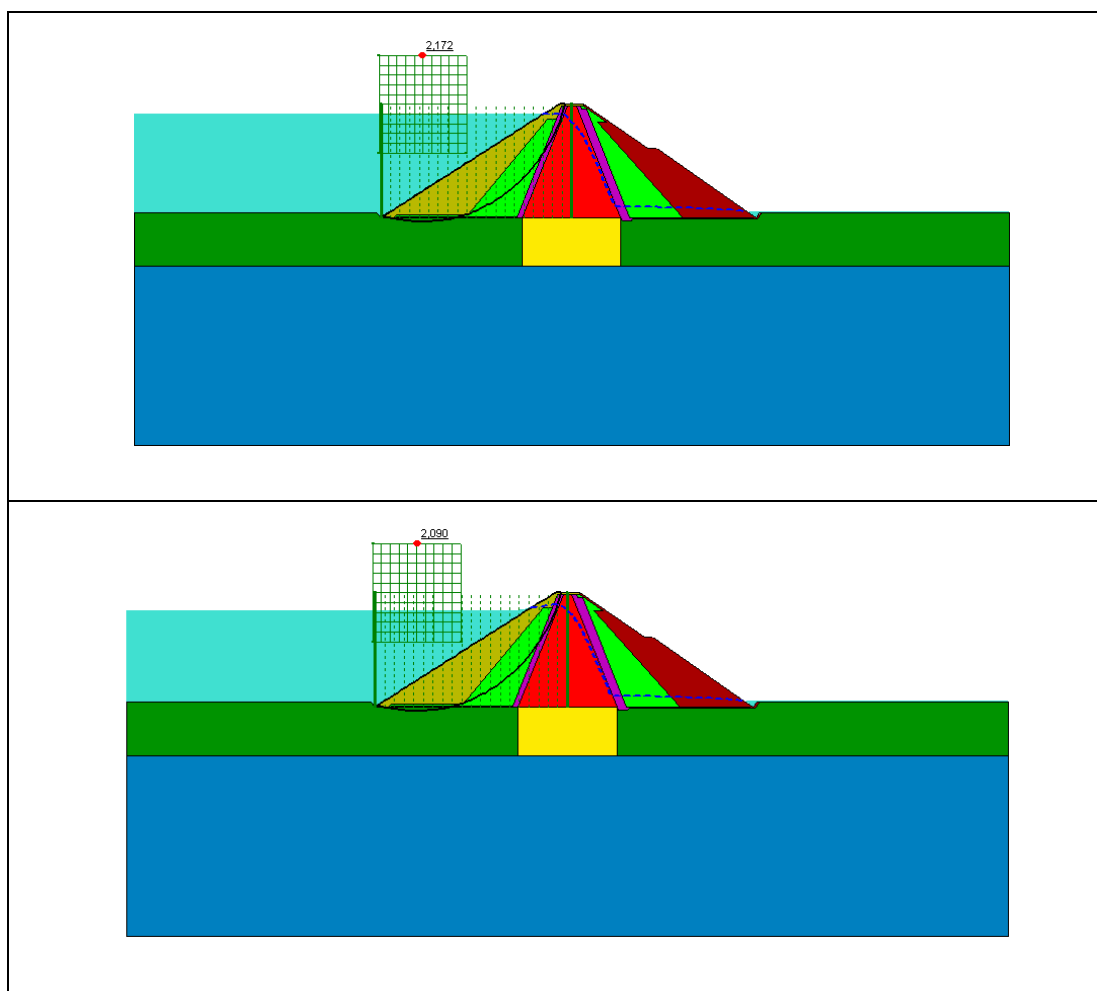


Fig. A.3.1 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 0 e 6 horas.

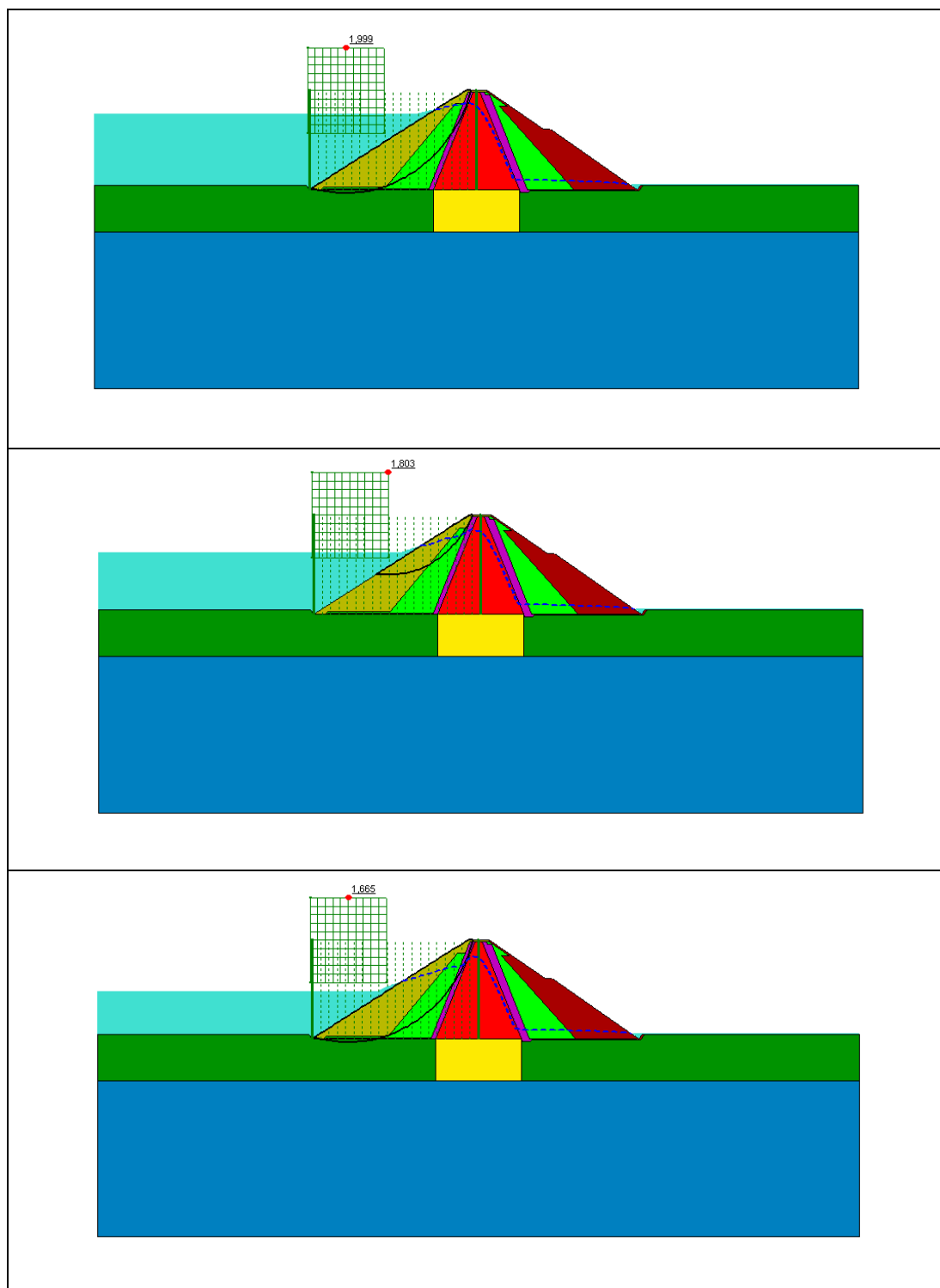


Fig. A.3.2 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

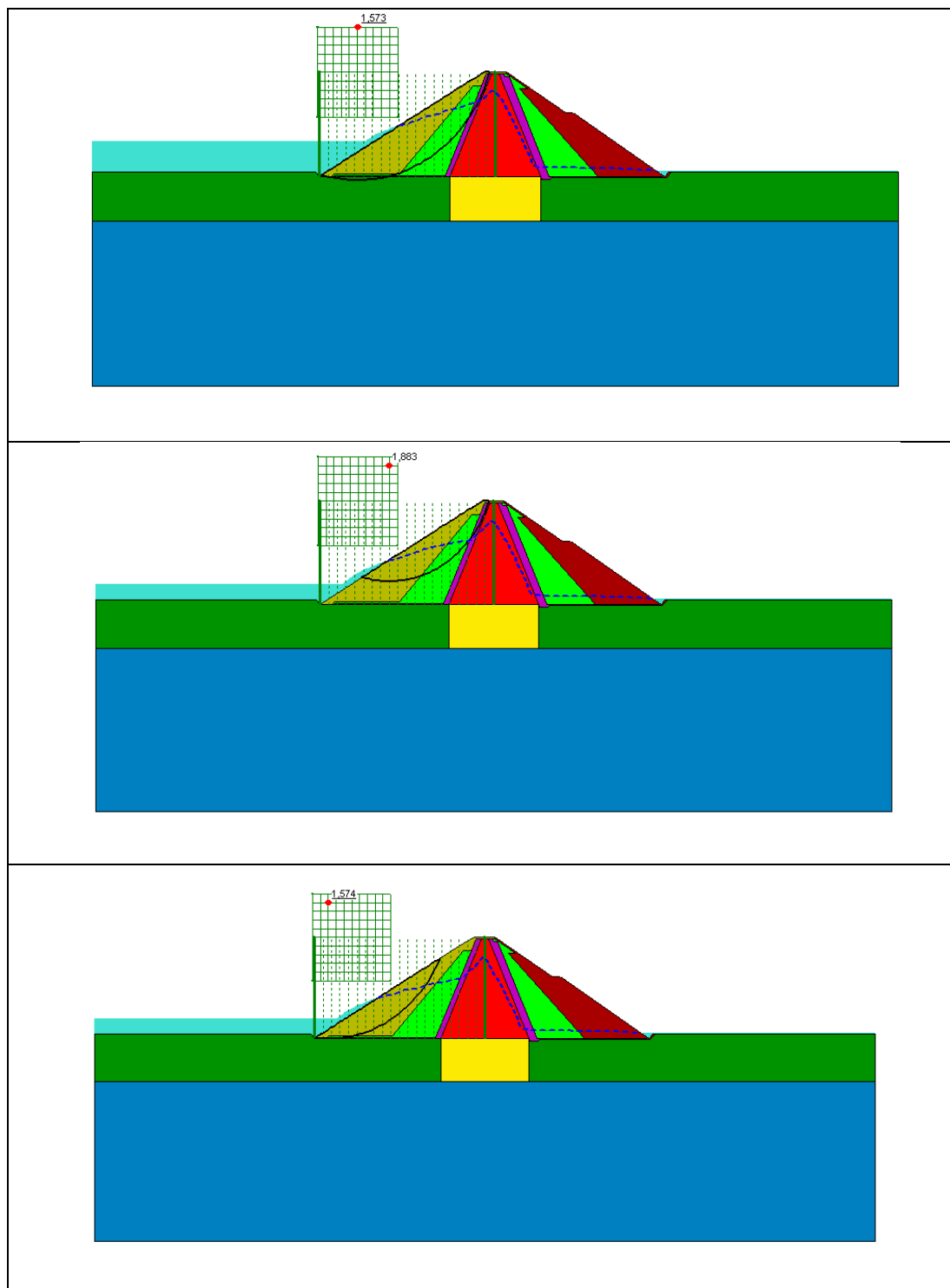


Fig. A.3.3 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

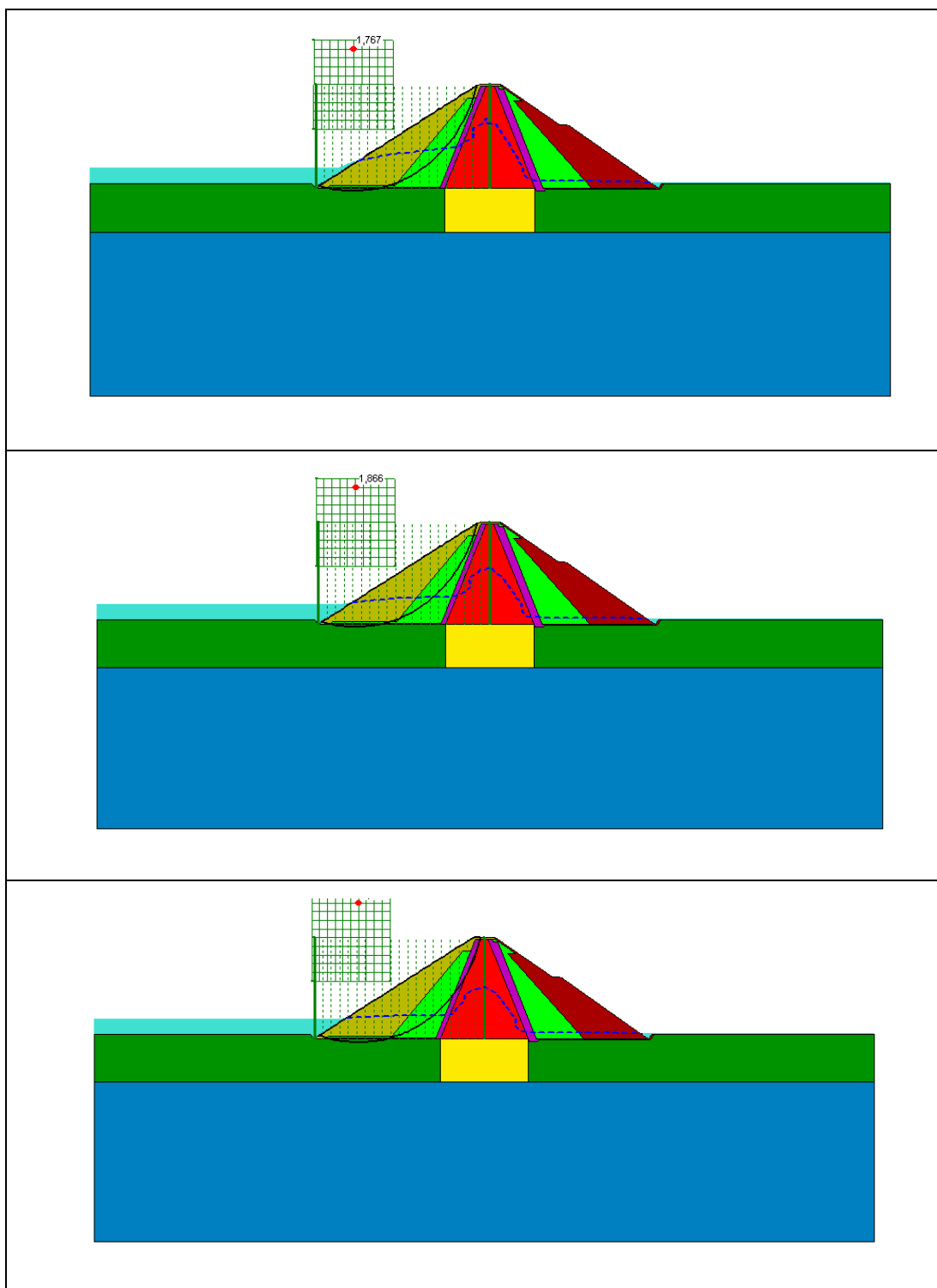


Fig. A.3.4 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 7 dias, 15 dias e 21 dias.



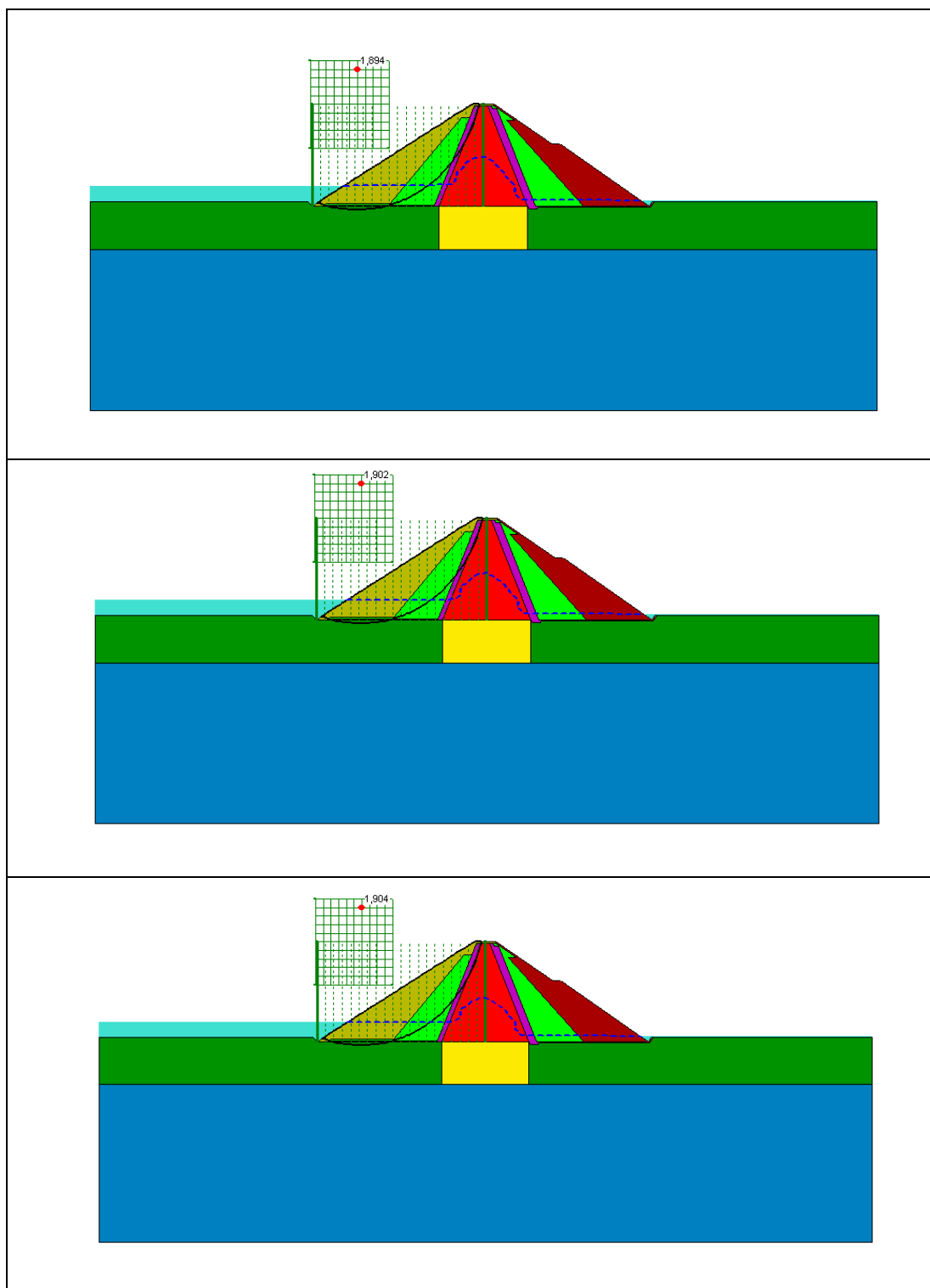


Fig. A.3.5 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

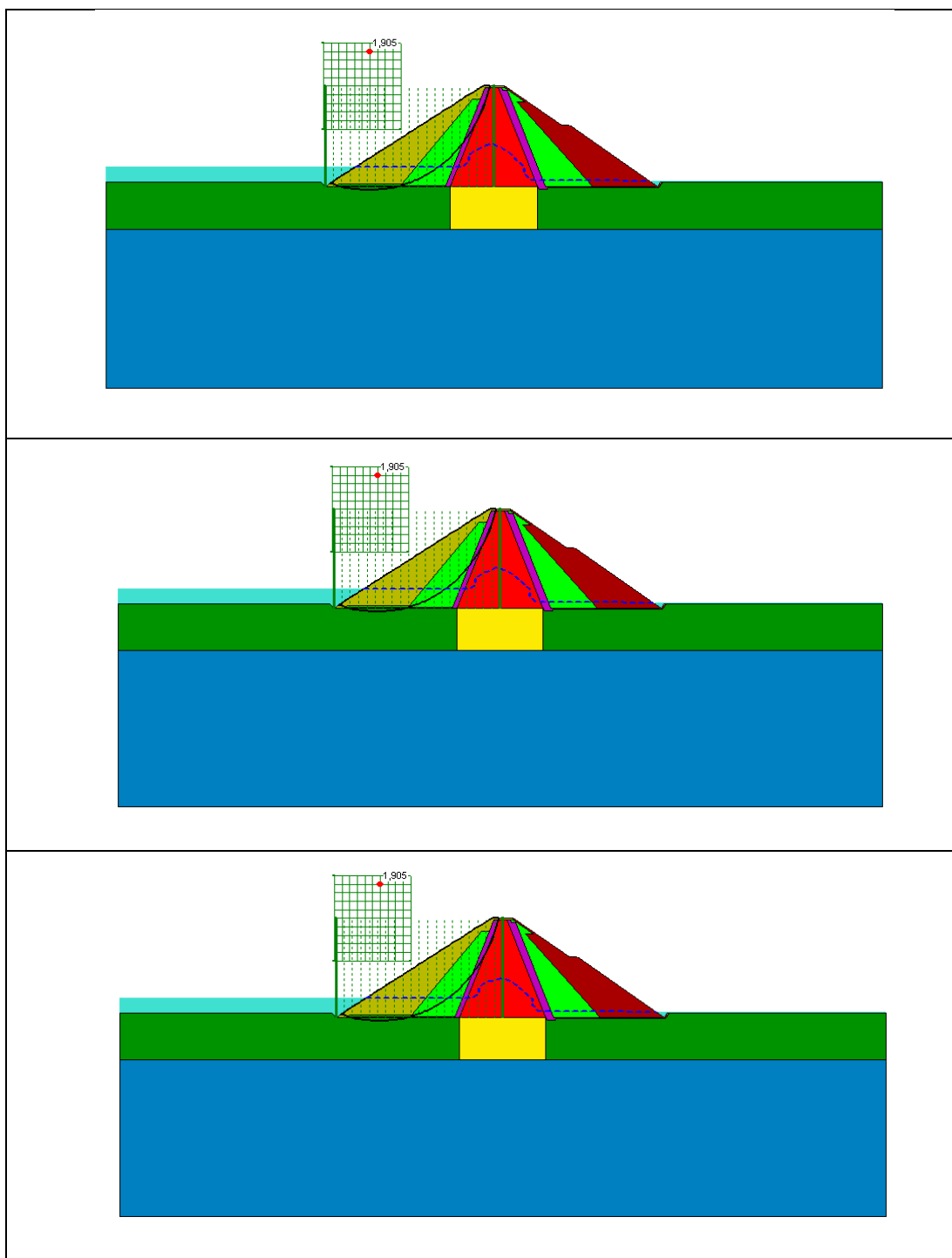


Fig. A.3.6 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 75 dias, 90 dias e 105 dias.

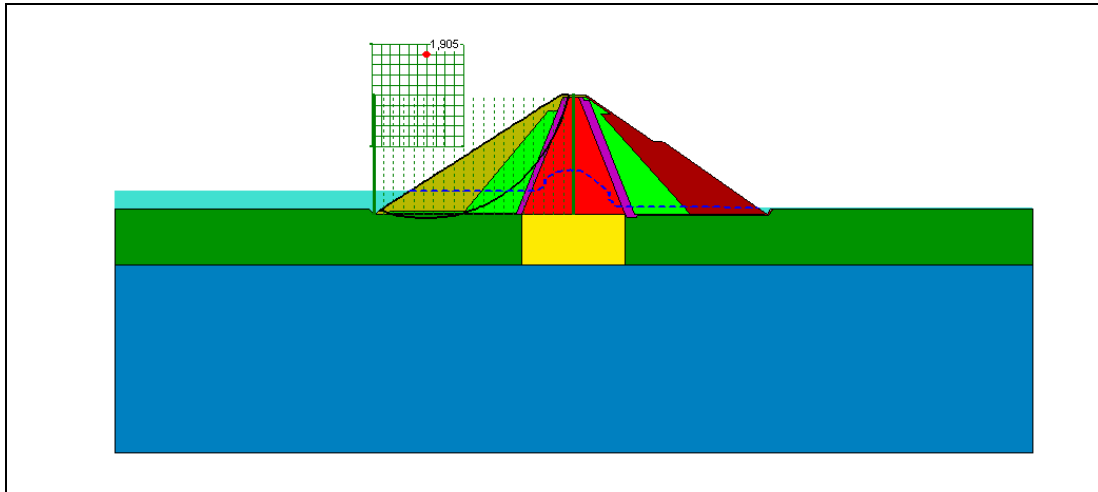


Fig. A.3.7 – SLOPE/W - Fator de segurança crítico para 120 dias.

São agora apresentados nas Figs. A.3.8 a A.3.14 os resultados obtidos pelo programa SLIDE.

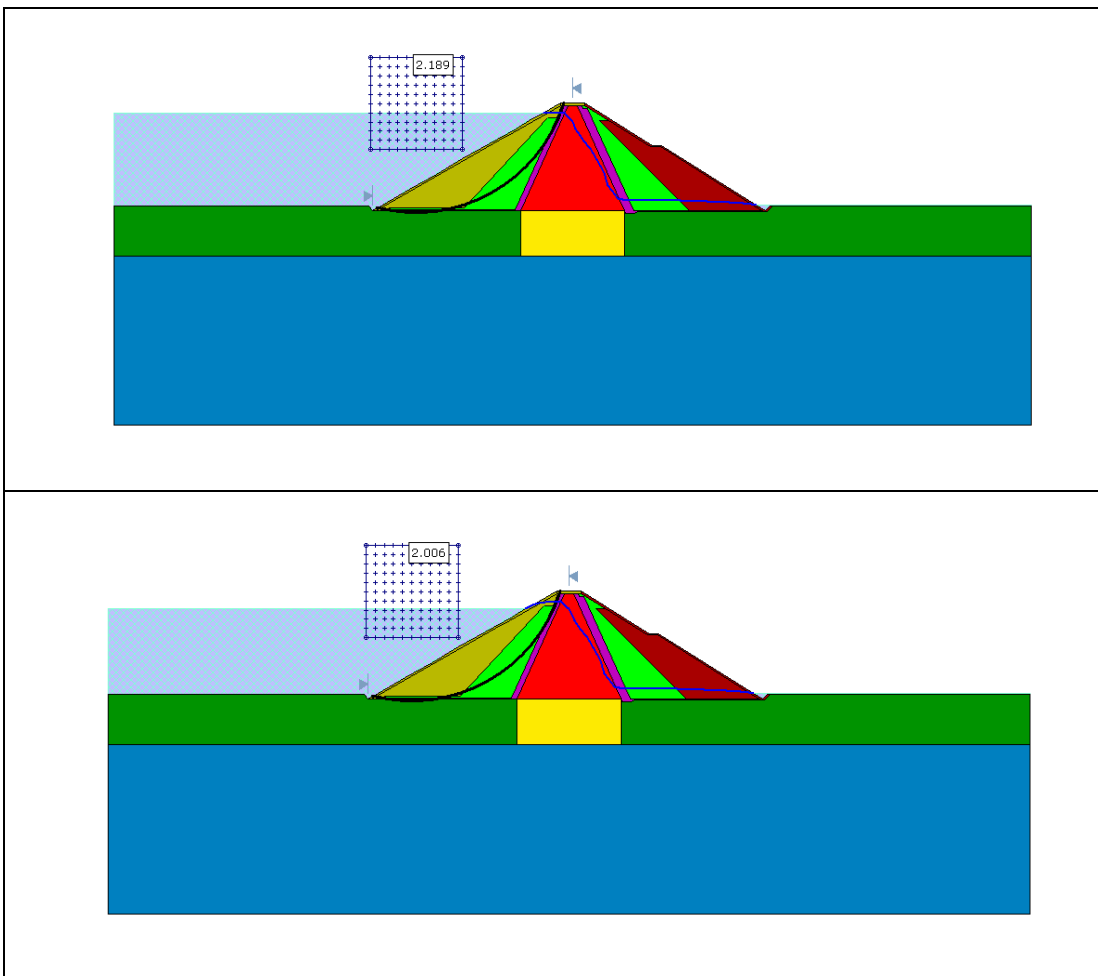


Fig. A.3.8 – SLIDE - Fator de segurança crítico para o tempo inicial e 6 horas.

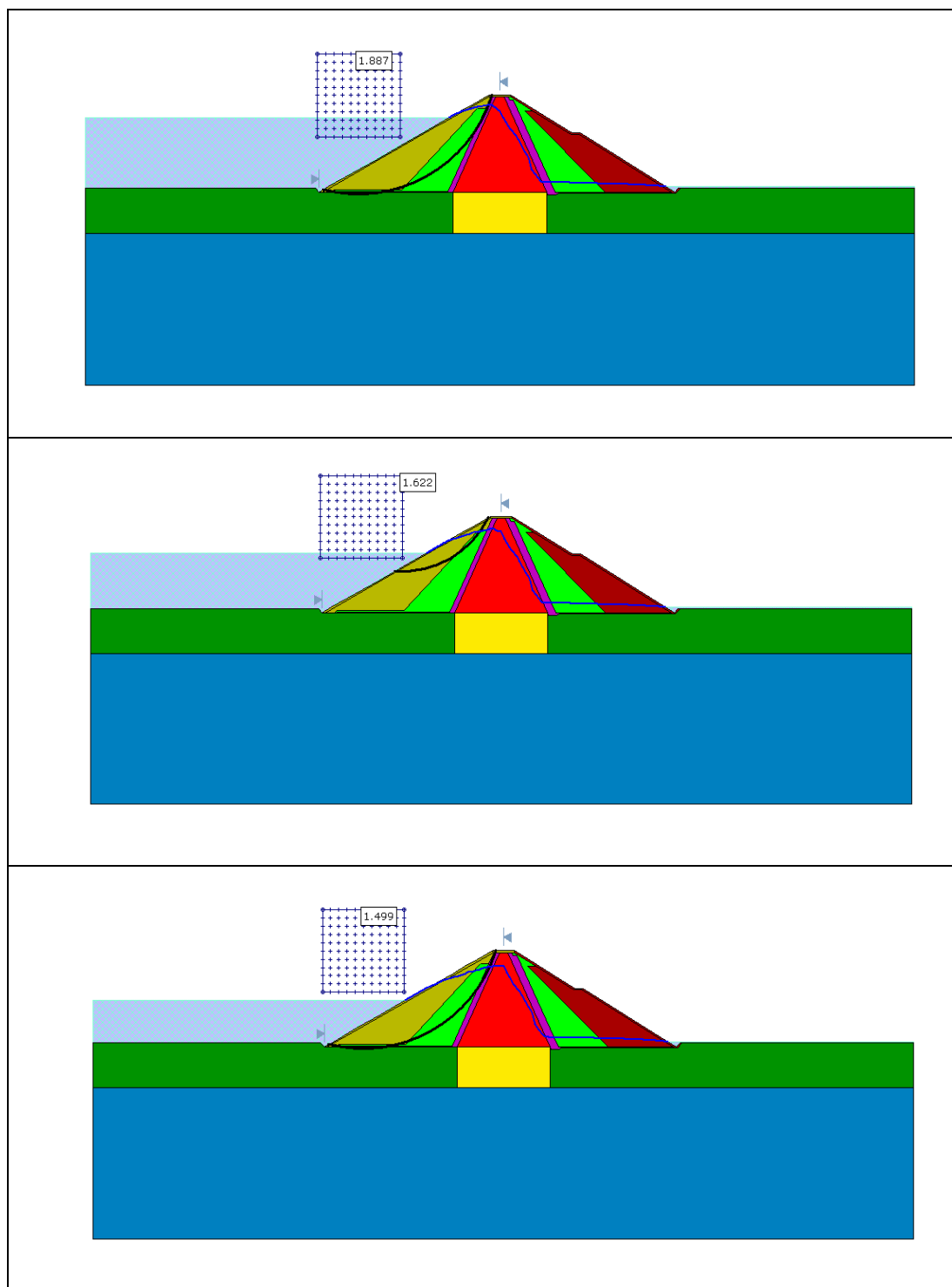


Fig. A.3.9 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 12 horas, 1 dia e 1,5 dias.

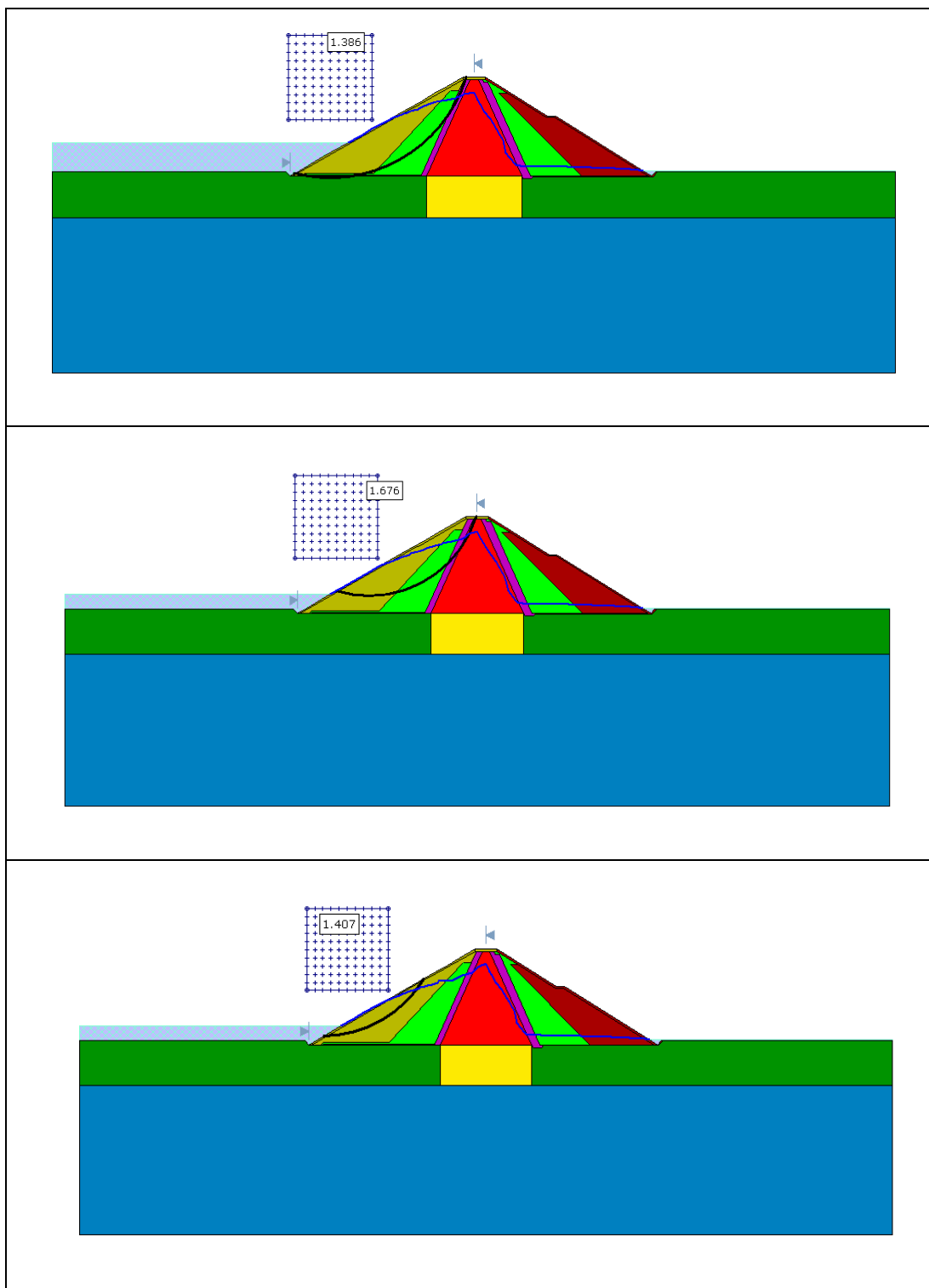


Fig. A.3.10 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 2 dias, 2,5 dias e 3 dias.

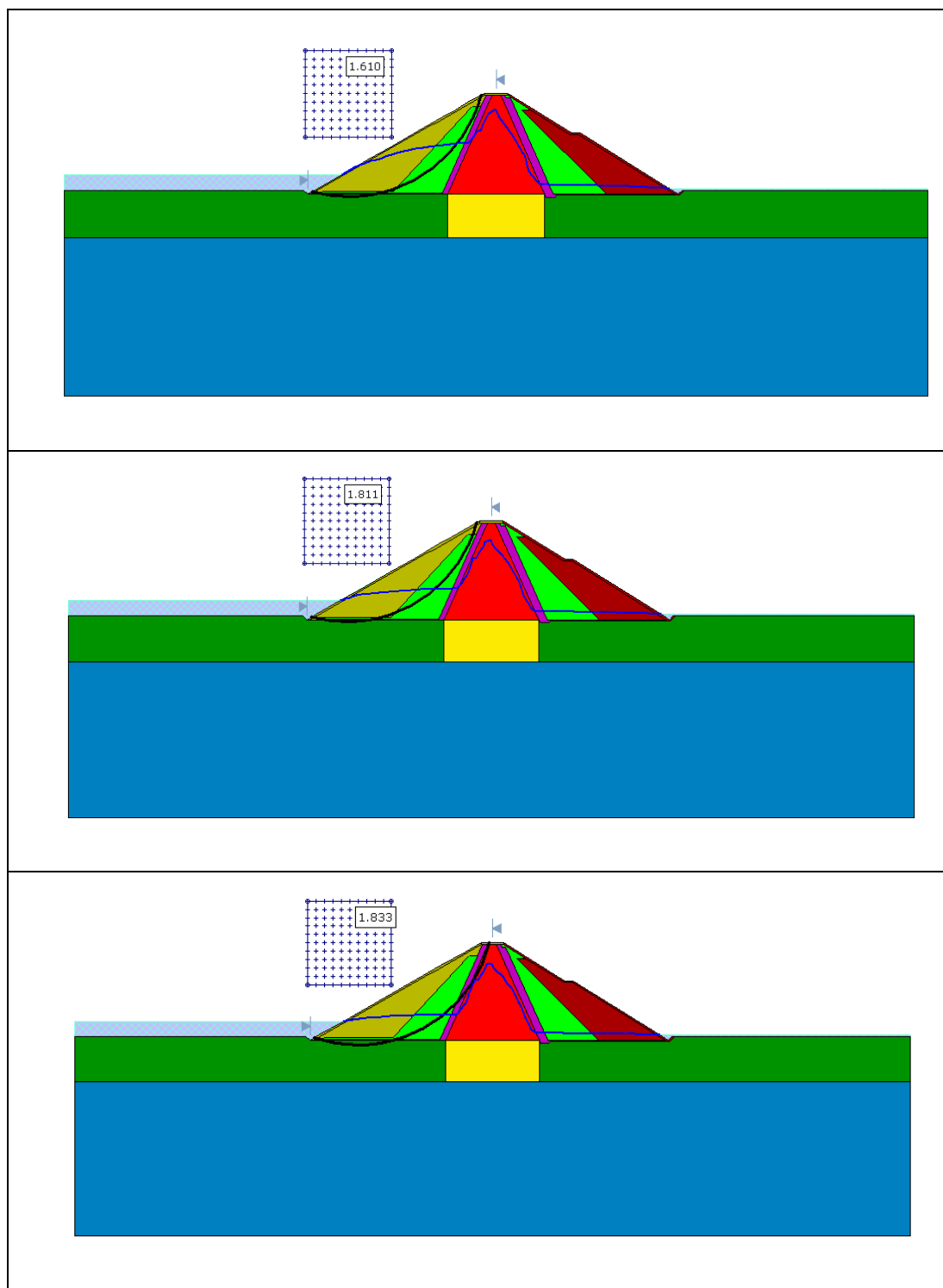


Fig. A.3.11 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 7 dias, 15 dias e 21 dias.

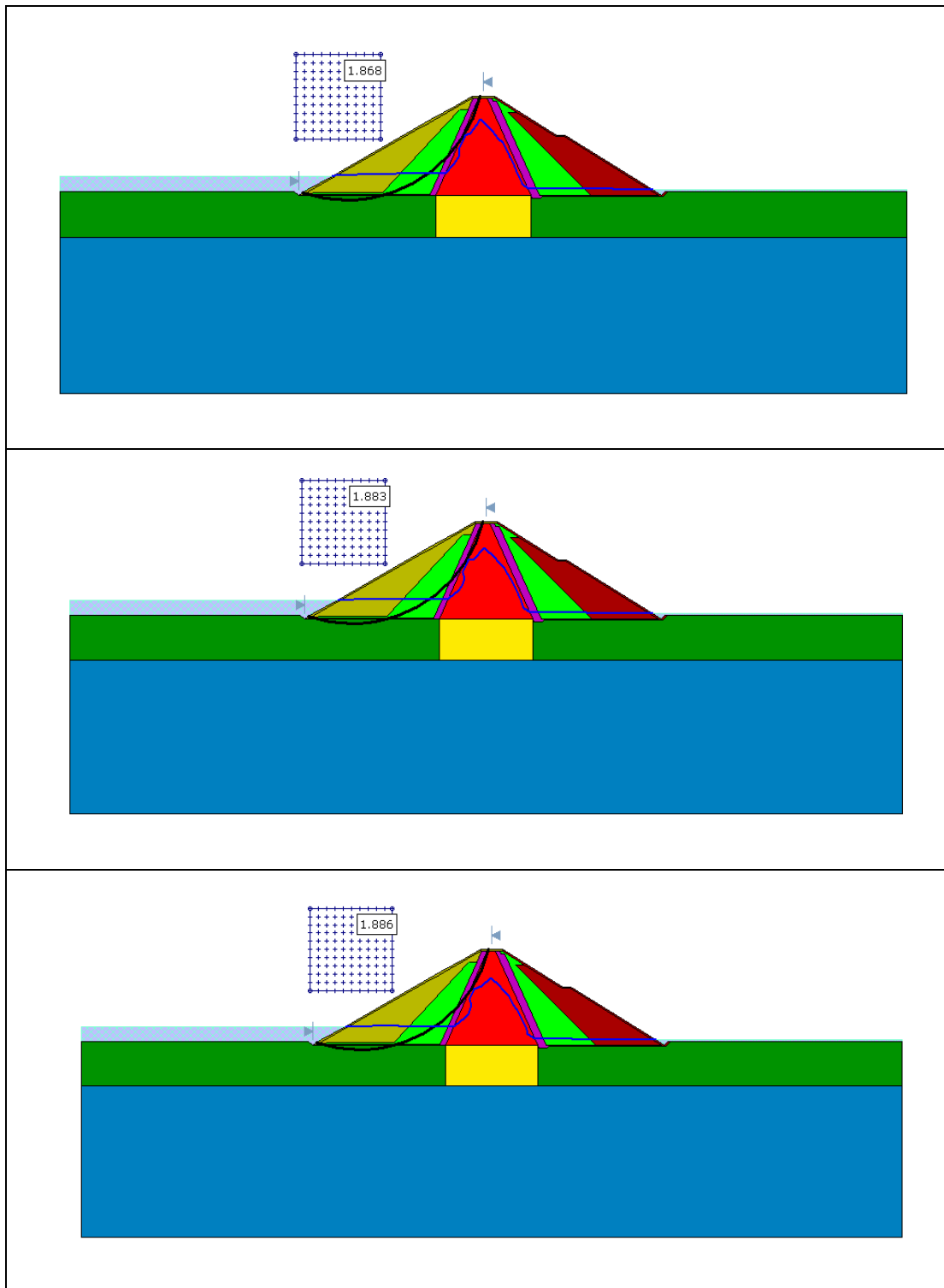


Fig. A.3.12 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 30 dias, 45 dias e 60 dias.

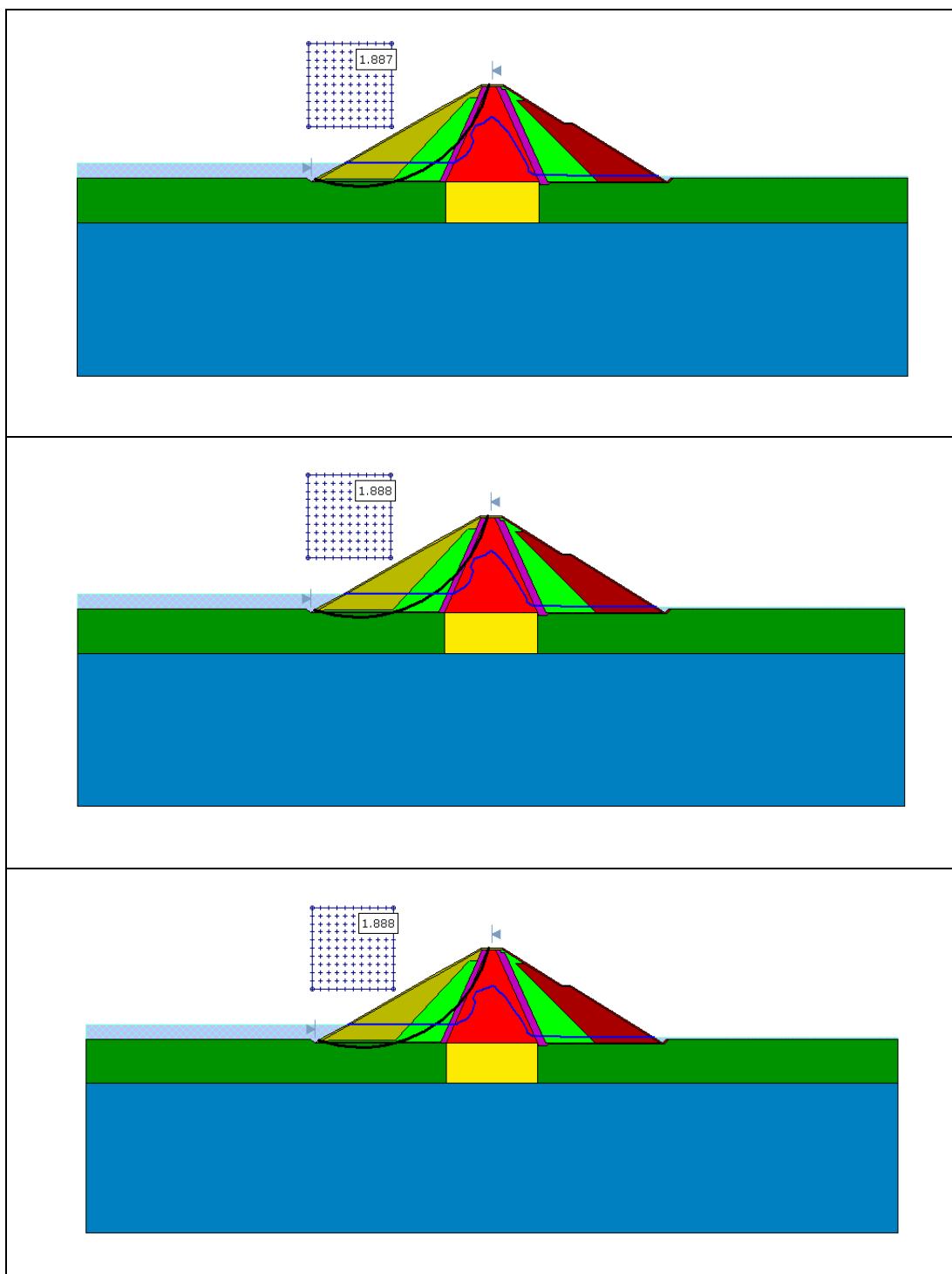


Fig. A.3.13 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 75 dias, 90 dias e 105 dias.



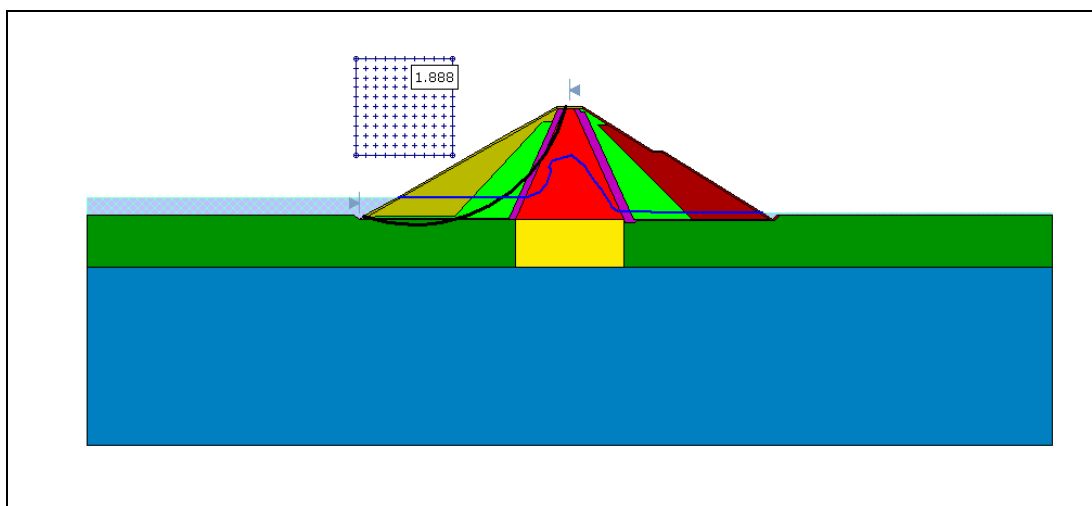


Fig. A.3.14 – SLIDE - Fator de segurança crítico para 120 dias.